การเพิ่มประสิทธิภาพแสงสว่างในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักเพื่อการประหยัดพลังงาน: กรณีศึกษา โครงการพฤกษา เรียล เอสเตท

นายต่อพงษ์ ลิ่มสัญจกร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AN INCREASE OF LIGHTING PERFORMANCE FOR ENERGY SAVING IN A GUEST ROOM CORRIDOR: A CASE STUDY OF PRUKSA REAL ESTATE

Mr. Torpong Limlunjakorn

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Architecture
Department of Architecture
Faculty of Architecture
Chulalongkorn University
Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มประสิทธิภาพแสงสว่างในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักเพื่อการประหยัดพลังงาน: กรณีศึกษา โครงการพฤกษา เรียล เอสเตท
โดย	นายต่อพงษ์ ลิ่มลัญจกร
สาขาวิชา	สถาปัตยกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ พรรณชลัท สุริโยธิน

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. ปิ่นรัชฎ์ กาญจนัษฐิติ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. อรรจน์ เศรษฐบุตร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ พรรณชลัท สุริโยธิน)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรภัทร์ อิงคโรจน์ฤทธิ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธาริณี รามสูต)

ต่อพงษ์ ลิ่มลัญจกร : การเพิ่มประสิทธิภาพแสงสว่างในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักเพื่อการประหยัดพลังงาน: กรณีศึกษา โครงการพฤกษา เรียล เอสเตท (AN INCREASE OF LIGHTING PERFORMANCE FOR ENERGY SAVING IN A GUEST ROOM CORRIDOR: A CASE STUDY OF PRUKSA REAL ESTATE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. พรรณชลัท สุริโยธิน, 110 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพความสว่างในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก ภายในโครงการพลัม คอนโดมิเนียม พหลยธิน 89 ของ บริษัท พฤกษา เรียล เอสเตท จำกัด โดยจากการเข้าสำรวจโครงการเบื้องต้น พบว่า พื้นที่ดังกล่าวมีค่าความสว่างไม่เพียงพอตามเกณฑ์และมีค่าใช้จ่ายไฟฟ้าต่อเดือนสูง งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาถึงการเพิ่มประสิทธิภาพความสว่างโดยการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิว ที่สัมพันธ์กับปริมาณแสงของหลอดไฟเพื่อให้พื้นที่ดังกล่าวมีค่าความสว่างตามเกณฑ์ โดยจะนำมาพิจารณาร่วมกับอุปกรณ์ daylight sensor และ motion sensor เพื่อลดค่าใช้จ่ายไฟฟ้า โดยลักษณะพื้นที่ที่ทำการศึกษา มีลักษณะเป็นทางเดินหน้าห้องพักยาว 95 เมตร กว้าง 1.50 เมตร สูง 2.20 เมตร มีช่องเปิดหน้าต่างบริเวณโถงลิฟท์และสุดปลายทางเดินทั้งสองด้าน ดำเนินงานวิจัยด้วยวิธีการการจำลองสถานการณ์แสงสว่างด้วยโปรแกรม DIALux 4.12 วิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพความสว่างที่เพิ่มขึ้นและการประหยัดค่าใช้จ่ายไฟฟ้าการใช้อุปกรณ์

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มประสิทธิภาพแสงธรรมชาติโดยการการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวเป็นวิธีที่ดีที่สุดที่สามารถเพิ่มความสว่างได้ทั้งพื้นที่และทุกช่วงเวลา โดยเมื่อพิจารณาจากอาคารกรณีศึกษาดั้งเดิมที่มีความสว่างไม่เพียงพอ การเลือกใช้หลอดไฟที่มีความสว่าง 1,200 lumen และกำหนดค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวเท่ากับ 0.70 จะทำให้พื้นที่ดังกล่าวมีค่าความสว่างขั้นต่ำ (E_{min}) เฉลี่ยคือ 54 lux ซึ่งเพียงพอตามเกณฑ์ และเมื่อพิจารณาร่วมกับการใช้งานอุปกรณ์ daylight sensor และ motion sensor จะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายไฟฟ้าได้ปีละประมาณ 4,428 บาท/ชั้น/ปี งานวิจัยนี้ยังศึกษาถึงทิศทางและแนวโน้มของความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สะท้อนแสงของพื้นผิวและปริมาณแสงของหลอดไฟที่มีผลต่อความสว่างของพื้นที่ สามารถนำผลการวิจัยนี้เป็นแนวทางเพื่อองค์ประกอบหนึ่งในการปรับปรุงอาคารลักษณะนี้ หรือร่วมกับงานวิจัยอื่นๆ เพื่อการประหยัดพลังงานทั้งอาคารดั้งเดิมที่มีอยู่แล้วหรืออาคารที่จะเกิดขึ้นต่อไปในอนาคต

ภาควิชา สถาปัตยกรรมศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา สถาปัตยกรรม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2559

5873569025 : MAJOR ARCHITECTURE
KEYWORDS:

TORPONG LIMLUNJAKORN: AN INCREASE OF LIGHTING PERFORMANCE FOR ENERGY SAVING IN A GUEST ROOM CORRIDOR: A CASE STUDY OF PRUKSA REAL ESTATE. ADVISOR: ASSOC. PROF. PHANCHALATH SURIYOTHIN, 110 pp.

The purpose of this research is to study how to increase efficiency of the lighting usage in the Guestroom corridor of Plum condominium, Paholyothin 89 by Pruksa Real Estate Co.,Ltd. According to preliminary inspections, the results not only show that the significance amount of luminance isn't enough for the requirements but also the high cost monthly electricity usage. To increase the reflectance factor of interior surfaces, either to choose suitable luminous flux for expected lighting requirements standard. Also consider with daylight sensors and motion sensor to decrease the cost of electricity. The base case study were done is in the guestroom corridor which has L x W x H = 90.00 x 1.50 x 2.20 meters. It has the open window in lift hall area and also at both ends of the hallway. Use the DIALux 4.12 program to create lighting simulation to understanding and analyze coming to the conclusion of which methods would be the best solution.

The results show that, by increase the reflectance factor is the best method to increase the area luminance, more efficiency with suitable luminous flux . Due to the past usage of 1,200 lumen , with the reflectance of 0.70, it results in the E_{min} average up to 55 lux, enough for lighting required standard. However, consider with daylight sensor and motion sensor, this could save the electricity up to 4,428 baht/floor. The purpose of this research is to study the possibility of relationship between the reflectance factor and light blub luminous flux, which can be used for developing similar buildings, and helps other researches to maximize the use of energy with minimizing cost of it in the future.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Architecture Student's Signature .....
Field of Study: Architecture Advisor's Signature .....
Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้ ที่ได้รับจากคณาจารย์ทุกท่าน และบุคลากร ในคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์วิทยาลัย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ พรรณชลัท สุริโยธิน เป็นอย่างสูง ที่คอยให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางต่างๆ ตลอดจนการสละเวลา จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อรรจน์ เศรษฐบุตร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรภัทร์ อิงคโรจน์ฤทธิ์ และ ผศ. ดร. ธาริณี รามสูตร สำหรับความรู้ต่างๆ ทั้งในและนอกห้องเรียน ในหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิตนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท พฤกษา เรียล เอสเตท จำกัด ซึ่งให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รุ่น IDEA8 สำหรับทุกๆอย่างที่ผ่านมาตลอดระยะเวลา 2 ปี

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ ครอบครัว ลิ่มลัญจกร สำหรับการสนับสนุน การดูแลในทุกๆอย่าง รวมไปถึงกำลังใจที่ดีเสมอมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
บทที่ 1 10
บทนำ 10
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 10
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 12
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 12
1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย 12
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 13
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย 13
บทที่ 2 14
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 14
2.1 เกณฑ์และข้อกำหนดในการออกแบบระบบแสงสว่าง 14
2.1.3 ขอบเขต และข้อบัญญัติของพื้นที่ที่ทำการศึกษาวิจัย 15
2.2 ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับแสงธรรมชาติ 15
2.2.1 คุณสมบัติของแสง 15
2.2.2 พฤติกรรมของแสง 16
2.2.3 การโคจรของดวงอาทิตย์ 17
2.2.4 สภาพท้องฟ้า 17
2.2.5 ปัจจัยสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อแสงธรรมชาติ 18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

2.3 ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับแสงประดิษฐ์ 18
2.3.1 หลอดไฟฟ้าที่นิยมใช้ในปัจจุบัน 18
2.3.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพหลอดคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์และหลอด LED 19
2.3.3 สมการการคิดค่าไฟฟ้าพื้นฐาน 20
2.4 การออกแบบแสงสว่างในอาคารเบื้องต้น 20
2.4.1 แนวทางการออกแบบแสงสว่างภายในงานสถาปัตยกรรม (สมาคมไฟฟ้าส่องสว่างแห่งประเทศไทย, 2003) 20
2.4.2 แนวทางการออกแบบแสงสว่างในพื้นที่ทางสัญจรในอาคาร (สมาคมไฟฟ้าส่องสว่างแห่งประเทศไทย, 2003) 20
2.5 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง 21
2.5.1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุชนิดต่างๆ 21
2.5.2 การใช้ค่า Light Reflectance Value (LRV) 21
2.6 การใช้งานอุปกรณ์ควบคุมการหรี่ไฟอัตโนมัติ daylight sensor และ motion sensor 22
2.6.1 การทำงานของอุปกรณ์ควบคุมแสงสว่างด้วยแสงธรรมชาติ (daylight sensor) 22
2.6.2 การทำงานของอุปกรณ์เซนเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหว (motion sensor) 23
2.6.3 การเลือกใช้งานอุปกรณ์ควบคุมความสว่างดวงโคม 24
2.6.4 การแบ่งบริเวณควบคุม (zoning) 24
2.6.5 การทบทวนวรรณกรรมถึงแนวทางการศึกษาวิจัยอุปกรณ์ daylight sensor และ motion sensor 25
2.7 งานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง 26
2.7.1 แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพแสงธรรมชาติเบื้องต้น 26
2.7.2 การเพิ่มประสิทธิภาพความสว่างโดยการเพิ่มค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวในอาคาร 27
2.8 สรุปทฤษฎีและวิธีวิจัยที่นำไปใช้ในการศึกษา 28
2.9 ช่องว่างในงานวิจัยจากการทบทวนวรรณกรรม 28

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

บทที่ 3 30
วิธีดำเนินงานวิจัย 30
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย 30
3.2 ทบทวนกฎหมาย ข้อบังคับ และเอกสารที่เกี่ยวข้อง 30
3.3 สำรวจอาคารตัวอย่างเพื่อเก็บข้อมูลทางกายภาพและลักษณะแสงสว่างเกิดขึ้น 31
3.4 ขั้นตอนการกำหนดกรณีฐานในงานวิจัยเพื่อสร้างแบบจำลองทดสอบประสิทธิภาพแสงสว่าง 32
3.4.1 การกำหนดกรณีฐานในงานวิจัย 32
3.4.2 การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพแสงสว่าง 32
3.4.3 การสร้างพื้นที่พิจารณาระดับความส่องสว่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัย 34
3.5 การกำหนดตัวแปรควบคุมของสถานการณ์แสงสว่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัย 35
3.6 การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุและปริมาณแสงจากหลอดไฟ 35
3.6.1 การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง 35
3.6.2 การกำหนดปริมาณแสงจากหลอดไฟ 36
3.6 การจำลองสภาพแสงสว่าง 43
3.7 การพิจารณาการขอบเขตใช้งานอุปกรณ์ daylight sensor และ motion sensor 44
3.7.1 การแบ่งพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักออกเป็นส่วนตามลักษณะแสงสว่าง เพื่อกำหนดขอบเขตการทำงานของ daylight sensor 45
3.7.2 การกำหนดตำแหน่งการควบคุม (zoning) เพื่อจะสร้างชุดคำสั่งในการลดการใช้ดวงโคมในพื้นที่ 45
3.7.3 การพิจารณาความต้องการใช้ดวงโคมในแต่ละช่วงเวลาเพื่อพิจารณาหารูปแบบในการลดการใช้ดวงโคมหรือหรี่ไฟในตำแหน่งต่างๆ 45
3.7.4 การพิจารณาพิจารณารูปแบบในการลดการใช้ดวงโคมหรือหรี่ไฟในตำแหน่งต่างๆ 47

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

3.7.6 การแบ่งพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักออกเป็นส่วนตามพฤติกรรมผู้ใช้อาคาร เพื่อกำหนดของเขตการทำงานของ motion sensor....47
3.8 วิเคราะห์อัตราการลดการใช้พลังงานจากการใช้อุปกรณ์ daylight sensor และ motion sensor....48
3.9 สรุปผลการออกแบบและการนำไปใช้งาน....48
3.10 อภิปรายที่ได้จากการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ....49
บทที่ 4....50
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล....50
4.1 ศึกษาความสว่างจากระดับพื้นทำงานด้วยการจำลองสภาพการการให้แสงสว่างเสมือนจริงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ DIALux 4.12....50
4.1.1 แสดงจากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม ในพื้นที่คำนวณแสงสว่าง calculation grid 1....51
4.1.2 แสดงจากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน ในพื้นที่คำนวณแสงสว่าง calculation grid 1....55
4.1.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวกับความสว่างต่ำสุด (E_{AV}) ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม ในพื้นที่คำนวณแสงสว่าง calculation grid 2....61
4.1.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวกับความสว่างต่ำสุด (E_{AV}) ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน ในพื้นที่คำนวณแสงสว่างcalculation grid 2....67
4.2 ศึกษาอัตราค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวและเลือกใช้ดวงโคมที่มีปริมาณแสงเพียงพอต่อการใช้งาน....72
4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของ daylight sensor และ motion sensor....74
4.2.1 การศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของ daylight sensor....74
4.2.2 การศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของ motion sensor....76

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

บทที่ 5 81

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 81

5.1 สรุปผลการวิจัย 81

5.1.1 ปัญหาแสงสว่างที่เกิดขึ้นในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักภายในโครงการคอนโดมิเนียมและแนวทางการแก้ไข 81

5.1.2 ลักษณะแสงธรรมชาติที่เกิดขึ้นในพื้นที่ทางเดินหน้าห้องพัก 82

5.1.3 การเพิ่มปริมาณแสงจากหลอดไฟ 83

5.1.4 การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิว 83

5.1.5 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในกับปริมาณแสงหลอดไฟที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพความสว่างในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก 84

5.1.6 การสรุปประสิทธิภาพของการใช้อุปกรณ์ daylight sensor และ motion sensor ... 85

5.2 การนำไปประยุกต์ใช้ 86

5.3 ข้อเสนอแนะ 86

รายการอ้างอิง 87

ภาคผนวก 89

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 110

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญภาพ

ภาพที่ 1. 1 แผนภาพแสดงลักษณะแสงสว่างของพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก.....11

ภาพที่ 1. 2 แผนภาพแสดงลักษณะแสงสว่างเมื่อมีการเพิ่มค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวภายใน.....11

ภาพที่ 2. 1 แสดงสเปกตรัมของแสง 16

ภาพที่ 2. 2 สภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อปริมาณแสงธรรมชาติพื้นที่ภายใน.....18

ภาพที่ 2. 3 แสดงช่วงการสะท้อนตามมาตรฐานของ LRV.....22

ภาพที่ 2. 4 แสดงตัวอย่างการโซนการควบคุมของพื้นที่ที่มีช่องเปิดรับแสงธรรมชาติ.....24

ภาพที่ 2. 5 (ซ้าย) แสดงการแบ่งพื้นที่ของทางสัญจรที่ทำการศึกษาออกเป็นส่วนๆ ตามรูปแบบการใช้งานภาพที่ 2. 6 (ขวา) แสดงการพิจารณาความต้องการใช้ดวงโคมในแต่ละช่วงเวลา.....25

ภาพที่ 2. 7 แสดงขอบเขตการแบ่งฤดูกาล จำนวนวัน และช่วงเวลา ในการศึกษาวิจัย 26

ภาพที่ 3. 1 เครื่องวัดความส่องสว่าง Lux meter รุ่น LT Lutron LX-1108.....30

ภาพที่ 3. 2 โครงการตัวอย่างที่ทำการศึกษา.....31

ภาพที่ 3. 3 โครงการตัวอย่างที่ทำการศึกษา.....31

ภาพที่ 3. 4 แผนภาพแสดงลักษณะแสงสว่างที่เกิดขึ้นในพื้นที่ทางเดินห้องพักที่ได้ทำการเข้าสำรวจ.....32

ภาพที่ 3. 5 แสดงผังอาคาร Plum condominium.....33

ภาพที่ 3. 6 แสดงรูปตัด Plum condominium 33

ภาพที่ 3. 7 การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม DIALux 4.12.....33

ภาพที่ 3. 8 พื้นที่พิจารณาระดับความส่องสว่างบริเวณพื้นที่ทางเดินยาว (calculation grid 1).....34

ภาพที่ 3. 9 พื้นที่พิจารณาระดับความส่องสว่างบริเวณโถงลิฟต์ (calculation grid 2).....34

ภาพที่ 3. 10 ตำแหน่งของดวงโคมของและลักษณะการใช้งานภายในโครงการตัวอย่างที่ทำการศึกษา.....37

ภาพที่ 3. 11 แสดงผังไฟฟ้าดั้งเดิมของโครงการที่มีการวางตำแหน่งดวงโคมไว้ที่ประตูห้องพักและประตูซ่อมบำรุงงานระบบ.....38

ภาพที่ 3. 12 แสดงผังไฟฟ้าดั้งเดิม Plum condominium และการแบ่งการใช้งานของชุดวงจรไฟฟ้า 39

ภาพที่ 3. 13 ค่า false colors rendering ที่แสดงระดับความสว่างที่ใช้ในงานวิจัย.....40

ภาพที่ 3. 14 แสดงผังไฟฟ้าที่ทำการปรับปรุงเพื่อใช้ในงานวิจัย Plum condominium.....41

ภาพที่ 3. 15 การจำลองสถานการณ์แสงสว่างเพื่อศึกษาถึงรูปแบบแสงสว่างและค่าเฉลี่ยแสงสว่าง E_{av} 42

ภาพที่ 3. 16 การตั้งค่าตัวแปรต่างๆในโปรแกรม DIALux 4.12 43

ภาพที่ 3. 17 แผนการจำลองแสงสว่างในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักที่มีอัตราค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในตั้งแต่ 0.20-0.70 และและใช้หลอดไฟ LED ที่มีปริมาณแสงสว่างตั้งแต่ 400-1200 lumen 43

ภาพที่ 3. 18 แสดงการจำลองสถานการณ์แสงสว่างพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก โดยการใช้หลอดไฟที่มีค่าความสว่าง 1,000 lumen ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง 40%.....44

ภาพที่ 3. 19 แสดงการจำลองสถานการณ์แสงสว่างพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก โดยการใช้หลอดไฟที่มีค่าความสว่าง 1,000 lumen ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง 60%.....44

ภาพที่ 3. 20 แสดงการจำลองสถานการณ์แสงสว่างพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก โดยการใช้หลอดไฟที่มีค่าความสว่าง 1,000 lumen ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง 60%.....44

ภาพที่ 3. 21 แสดงการจำลองสถานการณ์แสงสว่างพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก โดยการใช้หลอดไฟที่มีค่าความสว่าง 1,000 lumen ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง 70%.....44

ภาพที่ 3. 22 การแบ่งพื้นที่ทาสัญจรห้องพักออกเป็นส่วนต่างๆ ในการนำมาศึกษาวิจัยเรื่องประสิทธิภาพการใช้อุปกรณ์ 45

ภาพที่ 3. 23 การกำหนดสัญลักษณ์ดวงโคมเพื่อพิจารณาหารูปแบบชุดคำสั่งการลดการใช้ดวงโคม 45

ภาพที่ 3. 24 การจำลองสถานการณ์แสงธรรมชาติเพื่อศึกษาถึงตำแหน่งการลดการใช้ดวงโคม.....47

ภาพที่ 3. 25 ขอบเขตการทำงานของ motion sensorช่วงเวลากลางวัน 48

ภาพที่ 3. 26 ขอบเขตการทำงานของ motion sensorช่วงเวลากลางคืน.....48

ภาพที่ 4. 1 แสดงค่าความสว่างต่ำสุด E_{min} ในพื้นที่ calculation grid 1 เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 2 วันสำคัญ.....73

ภาพที่ 4. 2 ตัวอย่างการตั้งรูปแบบ A การลดการใช้ดวงโคม ในโปรแกรม DIALux 4.12.....74

ภาพที่ 4. 3 ตัวอย่างการจำลองสถานการณ์แสงสว่างจากการใช้ชุดคำสั่งต่างๆของอุปกรณ์ daylight sensor เพื่อทดสอบค่าความสว่างเฉลี่ย (E_{min}) ของวันที่ 21 ธันวาคม ช่วงเวลา 09.00 น. – 10.00 น. 75

ภาพที่ 4. 4 ตัวอย่างการจำลองสถานการณ์แสงสว่างในช่วงเวลากลางคืนเมื่อมีการใช้อุปกรณ์ motion sensor ที่ตั้งค่าการหรี่ไฟตั้งแต่ 50% – 80% 78

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2. 1 เกณฑ์ส่องสว่างของทางเดินภายในอาคารที่อยู่อาศัยรวมที่ใช้ในประเทศไทย 15

ตารางที่ 2. 2 การเปรียบเทียบหลอดคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์เดิมกับหลอด LED ที่พบในท้องตลาด.....19

ตารางที่ 2. 3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิววัสดุที่มีสีต่างๆ 21

ตารางที่ 3. 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของของวัสดุภายในโครงการที่ได้ทำการศึกษา....35

ตารางที่ 3. 2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงภายในพื้นที่ที่ทำการศึกษา.....36

ตารางที่ 3. 3 แสดงรูปแบบการลดการใช้ดวงโคมในการพิจารณาการทำงานของอุปกรณ์ daylight sensor.....47

ตารางที่ 4. 1 แสดงค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เมื่อมีการใช้อัตราค่าสะท้อนของพื้นผิวและปริมาณความสว่างของหลอดไฟต่างๆกัน จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างในวันที่ 21 ธันวาคม.....54

ตารางที่ 4. 2 แสดงค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เมื่อมีการใช้อัตราค่าสะท้อนของพื้นผิวและปริมาณความสว่างของหลอดไฟต่างๆกัน จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างในวันที่ 21 ธันวาคม.....59

ตารางที่ 4. 3 แสดงค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ย เมื่อมีการใช้อัตราค่าสะท้อนของพื้นผิวและปริมาณความสว่างของหลอดไฟต่างๆกัน จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างในวันที่ 21 ธันวาคม calculation grid 2.....65

ตารางที่ 4. 4 แสดงค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ย เมื่อมีการใช้อัตราค่าสะท้อนของพื้นผิวและปริมาณความสว่างของหลอดไฟต่างๆกัน จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างในวันที่ 21 ธันวาคม calculation grid 2.....71

ตารางที่ 4. 5 แสดงประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ daylight sensor ของวันที่ 21 ธันวาคม.....75

ตารางที่ 4. 6 แสดงประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ daylight sensor ของวันที่ 21 มิถุนายน 76

ตารางที่ 4. 7 แสดงประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ motion sensor ในช่วงเวลากลางคืน เมื่อตั้งค่าการหรี่ไฟตั้งแต่50% – 80% พิจารณาในพื้นที่ทางสัญจรยาว calculation grid 1.....79

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญแผนภูมิ

แผนภูมิที่ 4. 1 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 400 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน.....51

แผนภูมิที่ 4. 2 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 600 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน.....52

แผนภูมิที่ 4. 3 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 800 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน.....52

แผนภูมิที่ 4. 4 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,000 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน 53

แผนภูมิที่ 4. 5 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,200 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน 53

แผนภูมิที่ 4. 6 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,400 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน 54

แผนภูมิที่ 4. 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวกับความสว่างต่ำสุด (E_{min}) จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม ในพื้นที่คำนวณแสงสว่าง calculation grid 1 55

แผนภูมิที่ 4. 8 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 400 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน 56

แผนภูมิที่ 4. 9 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 600 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน 56

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

แผนภูมิที่ 4. 10 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 800 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน 57

แผนภูมิที่ 4. 11 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,000 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน 57

แผนภูมิที่ 4. 12 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,200 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน 58

แผนภูมิที่ 4. 13 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,400 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน 58

แผนภูมิที่ 4. 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในและปริมาณความสว่างจากหลอดไฟที่มีผลต่อความสว่างในพื้นที่ ของวันที่ 21 มิถุนายน พื้นที่การคำนวณแสงสว่าง calculation grid 1 60

แผนภูมิที่ 4. 15 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 400 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน.....61

แผนภูมิที่ 4. 16 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 600 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน.....62

แผนภูมิที่ 4. 17 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 800 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน.....62

แผนภูมิที่ 4. 18 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,000 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน 63

แผนภูมิที่ 4. 19 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,200 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน 63

แผนภูมิที่ 4. 20 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,400 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน 64

แผนภูมิที่ 4. 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในและปริมาณความสว่างจากหลอดไฟที่มีผลต่อความสว่างในพื้นที่ ของวันที่ 21 ธันวาคม พื้นที่การคำนวณแสงสว่าง calculation grid 2 66

แผนภูมิที่ 4. 22 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 400 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน 67

แผนภูมิที่ 4. 23 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 600 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน 68

แผนภูมิที่ 4. 24 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 800 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน 68

แผนภูมิที่ 4. 25 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,000 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน 69

แผนภูมิที่ 4. 26 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,200 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน 69

แผนภูมิที่ 4. 27 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,400 lumen เมื่อมีการใช้อัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน.....70

แผนภูมิที่ 4. 28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในและปริมาณความสว่างจากหลอดไฟที่มีผลต่อความสว่างในพื้นที่ ของวันที่ 21 ธันวาคม พื้นที่การคำนวณแสงสว่างcalculation grid 2 72

แผนภูมิที่ 4. 29 แสดงค่าใช้จ่ายไฟฟ้าใน 1 ชั้น ของพื้นที่ทางเดินห้องพัก Plum condominium เปรียบเทียบกับเมื่อมีการใช้อุปกรณ์ควบคุมการหรี่ไฟเพื่อประหยัดพลังงาน 80

แผนภูมิที่ 5. 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประมาณแสงจากหลอดไฟที่มีผลต่อความสว่างของพื้นที่.....83

แผนภูมิที่ 5. 2 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่มีผลต่อความสว่างของพื้นที่.....84

แผนภูมิที่ 5. 3 แสดงค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ยทุกทิศทางทั้ง 2 วันสำคัญ ในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก โครงการ Plum condominium จากการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์สะท้อนแสงของพื้นผิว เมื่อมีการใช้หลอดไฟที่มีประสิทธิภาพแสงสว่าง 1,200 lumen และ 1,400 lumen.....85

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

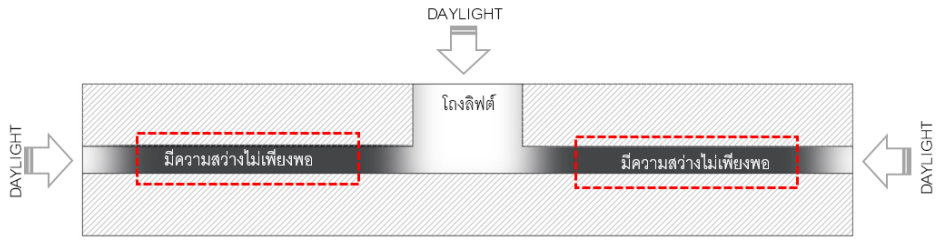
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

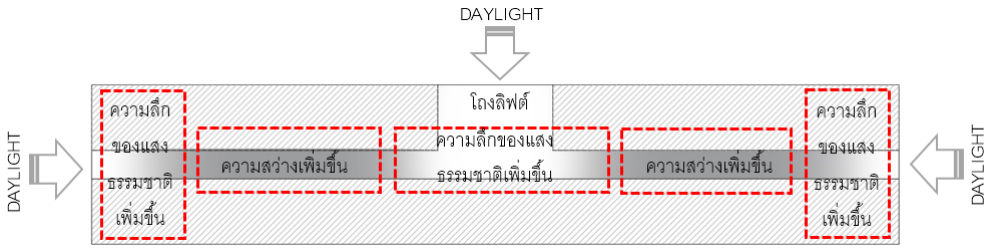
กรุงเทพมหานครเป็นเมืองหลวงที่มีประชากรทั้งสิ้น 5,692,284 คน มีความหนาแน่น 3,629 คน/ตร.กม. ส่งผลให้การก่อสร้างที่อยู่อาศัยในเขตเมืองนั้นต้องใช้พื้นที่ให้คุ้มค่าภายใต้ขนาดพื้นที่การก่อสร้างที่จำกัด “คอนโดมิเนียม” จึงเป็นที่อยู่อาศัยที่ได้รับความนิยมอย่างมาก มีจำนวนกว่า 2251 โครงการ หรือกว่า 333,980 ยูนิตในเขตกรุงเทพฯ (สำนักส่งเสริมธุรกิจอสังหาริมทรัพย์, 2556) ข้อได้เปรียบของที่อยู่อาศัยประเภทนี้คือ ทำเลที่ตั้งที่สะดวกในการเดินทาง ติดระบบคมนาคมขนส่งสาธารณะ ใกล้สาธารณูปโภค และราคาต่อยูนิตไม่แพงมากนัก การจัดสัดส่วนพื้นที่ใช้สอยในอาคารประเภทนี้คือ 1) ร้อยละ 55 – 60 คือพื้นที่ขาย 2) ร้อยละ 40 – 45 คือพื้นที่ส่วนกลาง โดยการใช้พลังงานไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก คือ พลังงานไฟฟ้าจากระบบปรับอากาศ (HVAC) ประมาณร้อยละ 40, การใช้พลังงานจากระบบไฟฟ้าแสงสว่าง ประมาณร้อยละ 20 – 30, การใช้พลังงานอุปกรณ์ไฟฟ้าในอาคารอื่นๆเช่น เครื่องทำน้ำร้อน และลิฟต์โดยสาร อีกประมาณร้อยละ 45 โดยการใช้พลังงานไฟฟ้าในส่วนอาคารพักอาศัยในปี 2533 มีการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมทั้งสิ้น 33,337 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง เป็นสัดส่วนร้อยละ 22.3 ของการใช้พลังงานฟ้าทั้งประเทศ โดยการใช้พลังงานไฟฟ้าแสงสว่างคิดเป็นร้อยละ 15 ของการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารทั้งหมด (กรมพัฒนาพลังงานทดแทน กระทรวงพลังงาน, 2553)

ลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักอาคารคอนโดมิเนียมที่พบเห็นได้ในเขตกรุงเทพและปริมณฑลเป็นการวางผังแบบทางเดินร่วม คือ เป็นทางเดินที่ยาวขนาบด้วยห้องพักทั้ง 2 ฝั่ง มีช่องเปิดหน้าต่างบริเวณสุดปลายทางเดิน โถงลิฟต์ที่มีช่องเปิดรับแสงธรรมชาติมักอยู่กึ่งกลางอาคาร ส่งผลให้ไม่สามารถนำแสงธรรมชาติเข้ามาในส่วนทางเดินหน้าห้องพักได้เต็มที่ ความสว่างจึงมีเพียงบริเวณใกล้ช่องเปิดเท่านั้นทำให้ในส่วนลึกของพื้นที่มีความสว่างไม่เพียงพอ อีกทั้งจากการเข้าสำรวจโครงการเบื้องต้นพบว่ายังมีการเลือกใช้ดวงโคมที่มีปริมาณแสงไม่เพียงพอต่อการใช้งาน โดยอาจเกิดจากการขาดความรู้ความเข้าใจในการออกแบบการส่องสว่างจึงทำให้มีระดับความส่องสว่างไม่เหมาะสม โดยพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักที่เลือกมาทำการวิจัยนั้น เป็นโครงการกรณีศึกษาที่ได้รับการอนุเคราะห์จาก บริษัท พฤกษา เรียลเอสเตท ที่สามารถเป็นตัวแทนคอนโดมิเนียมที่ยังประสบปัญหาแสงสว่างในพื้นที่ดังกล่าว



ภาพที่ 1. 1 แผนภาพแสดงลักษณะแสงสว่างของพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก

การเพิ่มประสิทธิภาพแสงธรรมชาติมีหลายวิธี เช่น การใช้หิ้งสะท้อนแสง แผงสะท้อนแสง ท่อนำแสง ฝ้าเพดานลาดเอียง แต่เทคนิคดังกล่าวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพแสงธรรมชาติได้เพียงบริเวณช่องเปิดเท่านั้น ไม่ส่งผลต่อส่วนลึกของพื้นที่ทางเดินหน้าห้องพักที่มีความยาวมาก อีกทั้งยังมีมูลค่าการติดตั้งที่ค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตาม อีกเทคนิคที่น่าสนใจคือการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในที่สามารถทำได้โดยง่าย ไม่เสียค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพแสงธรรมชาติได้ทั้งบริเวณช่องเปิดและเพิ่มความสว่างโดยรวมของพื้นที่ได้ เนื่องเป็นการสะท้อนทั้งแสงธรรมชาติและแสงประดิษฐ์ที่ใช้งาน จากการศึกษางานวิจัยถึงการทดสอบการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักของอาคารพักอาศัย กรณีศึกษาจังหวัดขอนแก่นจากเดิม ฝ้าเพดาน 70% เพิ่มขึ้นเป็น 80% ผนังจากเดิม 50% เพิ่มขึ้นเป็น 70% พื้นจากเดิม 20% เพิ่มขึ้นเป็น 50% ผลการทดลองพบว่า ความสว่างเพิ่มขึ้นประมาณ 25 – 30 lux โดยการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในอาคารนั้นจะมีอิทธิพลในการเพิ่มแสงธรรมชาติได้มากกว่าทางเลือกในการออกแบบอื่นๆ (พัชริยา ชินฮาต, 2553) อีกทั้งจากการศึกษางานวิจัยที่ทำการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวตั้งแต่ 0.10 – 0.90 กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 36W ภายใต้สถานการณ์แสงธรรมชาติภายในห้องสำนักงานกรณีศึกษา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวสามารถเพิ่มค่าความสว่างในพื้นที่ได้ เมื่อนำไปพิจารณากับอุปกรณ์ควบคุมความสว่างของดวงโคมด้วยแสงธรรมชาติจะยิ่งประหยัดพลังงานเพิ่มมากขึ้น (รุ่งทิพย์ พูนอัศวสมบัติ, 2553)



ภาพที่ 1. 2 แผนภาพแสดงลักษณะแสงสว่างเมื่อมีการเพิ่มค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวภายใน

จากที่กล่าวมา การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิว จึงมีความสำคัญมากในการเพิ่มความสว่างของพื้นที่ เมื่อพิจารณาควบคู่กับการเลือกหลอดไฟที่มีปริมาณแสงเหมาะสมกับการใช้งาน จะทำให้มีความส่องสว่างที่เพียงพอได้โดยที่ประหยัดพลังงานเพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างเช่น หากพื้นที่ทางสัญจรหน้า

ห้องพักในโครงการที่มีการเลือกใช้วัสดุตกแต่งภายในที่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่ำ ควรจำเป็นต้องเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสงเพิ่มมากขึ้นเพื่อให้พื้นที่มีความสว่างเพียงพอ งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในกับปริมาณแสงของหลอดไฟในโคมเดิมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพความสว่างในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก เพื่อให้พื้นที่ดังกล่าวมีค่าความสว่างตามเกณฑ์ และนำผลดังกล่าวไปพิจารณาร่วมกับอุปกรณ์ควบคุมการหรี่ไฟอัตโนมัติ daylight sensor และ motion sensor ในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดทางด้านเศรษฐศาสตร์และการประหยัดพลังงานพลังงาน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในกับปริมาณแสงหลอดไฟที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพความสว่างในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก

1.2.2 ศึกษาการใช้งานของอุปกรณ์ควบคุมการหรี่ไฟอัตโนมัติ daylight sensor และ motion sensor ในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1. ศึกษาเฉพาะพื้นที่ทางเดินหน้าห้องพัก โดยไม่คำนึงถึงสภาพแวดล้อมโดยรอบ

1.3.2. ศึกษาเฉพาะกรอบผนังของพื้นทางเดินหน้าห้องพัก โดยไม่คำนึงถึงพื้นที่ห้องพัก ตำแหน่งประตู บันไดหนีไฟ ห้องทิ้งขยะ หรือลิฟต์โดยสาร

1.3.3 ศึกษาแสงไฟฟ้าเฉพาะ general lighting โดยจะไม่คำนึงถึง decorative lighting

1.3.4 ศึกษาเฉพาะประสิทธิภาพของความส่องสว่างในเชิงปริมาณ โดยไม่พิจารณาถึงผลกระทบต่อความร้อนที่กระทำต่อพื้นที่

Chulalongkorn University

1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

1.4.1 ค่าการส่องสว่าง (illuminance) คือ ปริมาณแสงที่ตกกระทบลงบน 1 หน่วยพื้นที่ใดๆ มีหน่วยเป็น ลักซ์ (lux) โดยในงานวิจัยนี้จะทำการวัดค่าความส่องสว่างทั้ง 3 ชนิด คือ ค่าการส่องสว่างสูงสุด (E_{max}), ค่าการส่องสว่างต่ำสุด (E_{min}) และค่าการส่องสว่างเฉลี่ย (E_{av})

1.4.2 ค่าความสว่าง (luminance) คือ การที่แสงตกกระทบกับวัตถุแล้วสะท้อนกลับหรือส่องผ่านวัตถุเข้าสู่ตา ทำให้มองเห็นวัตถุนั้นได้ มีหน่วยเป็นแคนเดลาต่อตารางเมตร (cd/m^2)

1.4.3 ฟลักซ์ส่องสว่าง (luminous flux) คือ**ปริมาณแสง**ที่เปล่งออกมาจากแหล่งกำเนิด ในมุม solid angle ใดๆต่อหน่วยเวลา มีหน่วยเป็น ลูเมน (lumen, lm)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในกับปริมาณแสงหลอดไฟที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพความสว่างในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก

1.5.2 ทราบถึงประสิทธิภาพการใช้งานของอุปกรณ์ควบคุมการหรี่ไฟอัตโนมัติ daylight sensor และ motion sensor ในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในกับปริมาณแสงสว่างจากดวงโคมที่มีผลต่อค่าความสว่างในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักอาคารคอนโดมิเนียม: กรณีศึกษาโครงการพฤกษา เรียล เอสเตท จะมีระเบียบวิธีการศึกษาดังนี้

1.6.1 ศึกษาทฤษฎี แนวคิด และทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1.6.2 สำรวจอาคารตัวอย่าง ถึงรูปแบบงานสถาปัตยกรรมภายใน ระบบแสงสว่าง การใช้พื้นที่ และปัญหาแสงสว่างที่เกิดขึ้น

1.6.2.1 รูปแบบทางสถาปัตยกรรมภายใน ได้แก่ ผังพื้น รูปด้าน และคุณสมบัติของวัสดุตกแต่งภายใน

1.6.2.2 ระบบแสงสว่าง ได้แก่ ผังไฟฟ้า และ ชนิดและจำนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแสงสว่าง ซึ่งได้แก่ดวงโคมและหลอดไฟฟ้า

1.6.2.3 ปัญหาแสงสว่างที่เกิดขึ้น ได้แก่ ปัญหาด้านแสงธรรมชาติและแสงประดิษฐ์ที่พบในพื้นที่ทางเดินหน้าห้องพัก

1.6.3 วิเคราะห์ถึงรูปแบบงานสถาปัตยกรรมภายใน ระบบแสงสว่าง การใช้พื้นที่ และรูปแบบแสงสว่างที่เกิดขึ้นในอาคารตัวอย่าง เพื่อเลือกอาคารที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาเป็นกรณีฐาน (Base case) ในงานวิจัยโดยการสร้างแบบจำลองกรณีฐาน ผ่านโปรแกรมจำลองสถานการณ์แสงสว่าง DIALux 4.12

1.6.4 การจำลองสถานการณ์แสงสว่าง เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ของอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวภายใน (reflectance factor) และปริมาณแสงจากหลอดไฟฟ้า (lumen) ที่มีผลต่อค่าความส่องสว่างในพื้นที่ (illuminance)

1.6.5 ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในและปริมาณแสงจากหลอดไฟฟ้า รวมถึงตำแหน่งของดวงโคม ที่ให้ความสว่างเพียงพอตามเกณฑ์และเหมาะสมในการใช้งานของพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก

1.6.6 จำลองสภาพแสงสว่างโดยการหรี่ไฟชดเชย จากการใช้งานของอุปกรณ์ควบคุมการหรี่ไฟอัตโนมัติ daylight sensor และ motion sensor ในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก

1.6.7 อภิปรายผล

1.6.8 สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเรื่อง การเพิ่มประสิทธิภาพแสงสว่างเพื่อการประหยัดพลังงานในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก: กรณีศึกษา โครงการ พฤกษา เรียล เอสเตท มีการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนต่างๆ ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 6 ส่วนได้แก่

ส่วนที่ 1 ศึกษา เกณฑ์และข้อกำหนดในการออกแบบระบบแสงสว่างจากหน่วยงานต่างๆ โดยเน้นเฉพาะสำหรับการใช้งานพื้นที่ทางสัญจรในอาคาร

ส่วนที่ 2 ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับแสงธรรมชาติ

ส่วนที่ 3 ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับแสงประดิษฐ์

ส่วนที่ 4 ศึกษาหลักเบื้องต้นเกี่ยวกับการออกแบบแสงสว่างในอาคารเบื้องต้น

ส่วนที่ 5 ศึกษาเกี่ยวกับอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในอาคาร

ส่วนที่6 ศึกษาการใช้งานอุปกรณ์ควบคุมการหรี่ไฟอัตโนมัติ daylight sensor และ motion sensor

ส่วนที่ 7 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เกณฑ์และข้อกำหนดในการออกแบบระบบแสงสว่าง

มีหน่วยงานที่กำหนดมาตรฐานเกี่ยวกับการส่องสว่างในพื้นที่ต่างๆมากมาย เช่น Illuminating Engineering Society of North America (IESNA) ของประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีการใช้เกณฑ์ดังกล่าวกันอย่างแพร่หลายตามหลักสากล และในประเทศไทยจะมีสมาคมไฟฟ้าส่องสว่างแห่งประเทศไทย (TIEA) ที่เป็นมาตรฐานที่ใช้ควบคุมคุณภาพการส่องสว่างในบริเวณต่างๆ ที่พัฒนาโดยคนไทยและเหมาะกับการใช้ในตำแหน่งที่ตั้งของประเทศไทย หรือ กฎกระทรวงแรงงาน พ.ศ. 2549 ที่มุ่งเน้นในการจัดเกณฑ์ความสว่างในภาคอุตสาหกรรม โดยงานวิจัยนี้จะเลือกศึกษาเกณฑ์แสงสว่างในส่วนพื้นที่ทางสัญจรภายในอาคารทั้งแบบพื้นที่ทางสัญจรเบาบางและหนาแน่น โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.1 โดยค่าความส่องสวาง (illuminance) จะวัดได้ในหน่วย ลักซ์ (lux)

ตารางที่ 2. 1 เกณฑ์ส่องสว่างของทางเดินภายในอาคารที่อยู่อาศัยรวมที่ใช้ในประเทศไทย

ลำดับ	ช่องทางเดินภายในอาคารอยู่อาศัยรวม	IESNA	กฎกระทรวงแรงงาน พ.ศ. 2549 (lux)	TIEA (lux)
1	พื้นที่ทางสัญจรเบาบาง	-	20	-
2	พื้นที่ทางสัญจรหนาแน่น	50	**50**	50
3	บันได	100	50	50

ที่มา: IESNA (ASHRAE 90.1 version), (กฎกระทรวงแรงงาน, 2549), (สมาคมไฟฟ้าส่องสว่างแห่งประเทศไทย, 2003)

2.1.3 ขอบเขต และข้อบัญญัติของพื้นที่ที่ทำการศึกษาวิจัย

2.1.3.1 ขอบเขตของอาคารประเภทคอนโดมิเนียม (พระราชบัญญัติอาคารชุด พ .ศ. 2522)

คอนโดมิเนียม ที่รู้จักกันนั้นมีชื่อตามกฎหมายว่า “อาคารชุด” ซึ่งพระราชบัญญัติอาคารชุด พ .ศ. 2522 ได้ให้คำจำกัดความว่า “อาคารที่บุคคลสามารถแยกการถือกรรมสิทธิ์ออกได้เป็นส่วนๆ โดยแต่ละส่วนประกอบด้วย กรรมสิทธิ์ในทรัพย์ส่วนบุคคลและกรรมสิทธิ์ร่วมในทรัพย์ส่วนกลาง”

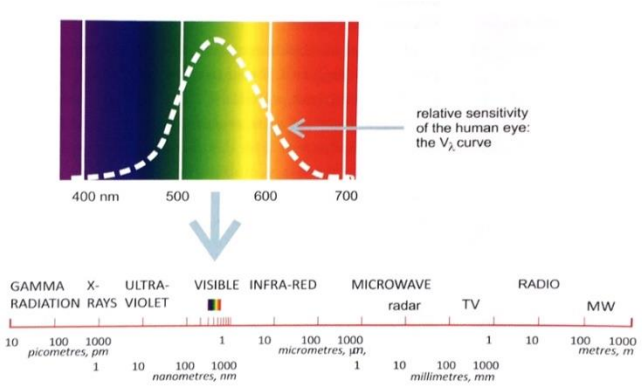
2.1.3.2 ข้อบัญญัติของพื้นที่ทางเดินห้องพัก (พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522)

- ช่องทางเดินอาคารที่อยู่อาศัยแบบรวม ว่าด้วยหอพัก สำนักงาน อาคารสาธารณะ อาคารพาณิชย์ โรงงาน อาคารพิเศษ ต้องมีความกว้างไม่น้อยกว่า 1.50 เมตร
- ห้องหรือส่วนของอาคารที่ใช้ในการทำกิจกรรมต่าง ๆ ต้องมีระยะดิ่งไม่น้อยกว่า 2.60 เมตร

2.2 ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับแสงธรรมชาติ

2.2.1 คุณสมบัติของแสง (Tregenza and Loe, 2014)

แสงเป็นพลังงานที่เคลื่อนที่ได้อยู่ในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พลังงานที่เคลื่อนที่เหล่านี้จะถูกกำหนดโดยความถี่ ในหน่วย เฮิรตซ์ (Hz) และความยาวคลื่น ในหน่วยนาโนมิเตอร์ (Nanometer) การเคลื่อนที่ในรูปแบบของคลื่นทำให้มีความยาวคลื่นเฉพาะตัวที่ต่างกัน กล่าวคือ ความถี่หรือความยาวคลื่นจะเป็นตัวกำหนดพลังงาน เมื่อนำพลังงานที่เคลื่อนที่ทั้งหมดจากพลังงานที่มีความยาวคลานต่ำสุดถึงความยาวคลื่นสูงสุดเรียกว่า สเปคตรัม (Spectrum) ของแสงหลายสี อันเกิดจากความถี่และความยาวคลื่นที่ต่างกัน มนุษย์จะสามารถแสงที่มองเห็นสเปคตรัมสีของแสงเป็นช่วงเล็กๆที่มีช่วงความยาวคลื่น 400–700 นาโนเมตร ระหว่างอินฟราเรด (IR) ถึง อัลตราไวโอเล็ต (UV) หรือแสงช่วงที่ตามองเห็น (Visible Light)



ภาพที่ 2. 1 แสดงสเปกตรัมของแสง

ที่มา : (Tregenza et al., 2014)

2.2.2 พฤติกรรมของแสง

คุณสมบัติของแสงเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน ทางเดินของสงจะเปลี่ยนไป ความเร็วของแสงจะลดลง เนื่องจากดัชนีค่าหักเหของตัวกลางนั้นๆ แสงจะแสดงพฤติกรรมหลัก 3 ประการ คือ ดูดกลืน (Absorption) สะท้อน (Reflection) และส่องผ่าน (Transmission) โดยคุณสมบัติของแสงข้างต้นเป็นสิ่งที่ต้องนำมาพิจารณาถึงผลกระทบของแสงธรรมชาติที่กระทำต่อพื้นที่ในงานสถาปัตยกรรม จึงเป็นสิ่งที่ควรนำมาศึกษาในการออกแบบและเทคนิคการให้แสงสว่าง (Lou, 1995)

1) การดูดกลืน (Absorption) เป็นปรากฏการณ์ที่แสงถูกดูดกลืนหายเข้าไปในตัวกลางและเปลี่ยนรูปของพลังงาน เช่น การฉายแสงขาวลงบนผนังสีแดง แสงสีอื่นๆจะถูกดูดกลืน หายเข้าไปยกเว้นแสงสีแดงเท่านั้นที่สะท้อนเข้าสู่ดวงตา เราจึงเห็นผนังเป็นสีแดง เมื่อมีการดูดกลืนพลังงานแสงเข้าไปในวัตถุใดๆ จะเกิดการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นพลังงานความร้อน
2) การสะท้อน (Reflection) เป็นพฤติกรรมของแสงที่ตกกระทบตัวกลางแล้วสะท้อนกลับออกมาโดยที่ความถี่ของคลื่นแสงไม่เปลี่ยนไป สามารถบ่งลักษณะการสะท้อนได้ดังนี้
   - การสะท้อนกลับหมด (Specular Reflection) จะเกิดเมื่อแสงตกกระทบบนตัวกลางที่เป็นวัสดุทึบแสง มีลักษณะเป็นผิวเรียบมันวาว (Polish Surface) ในพื้นผิวตกกระทบที่เรียบ มุมตกกระทบที่กระทำต่อพื้นผิวจะเท่ากับมุมสะท้อนกลับของแสง
   - การสะท้อนแบบกระจาย (Spread Reflection) จะเกิดขึ้นเมื่อแสงตกกระทบตัวกลางที่เป็นวัสดุทึบแสง มีลักษณะพื้นผิวตกกระทบที่ขรุขระ (Rough Surface) แสงจะสะท้อนแบบกระจัดกระจายไม่สม่ำเสมอในทิศทางเดียวกัน
   - การสะท้อนแบบกระเจิง (Diffuse Reflection) จะเกิดเมื่อแสงตกกระทบบนตัวกลางที่เป็นวัสดุทึบแสง มีลักษณะเป็นผิวเคลือบด้าน (Matte Surface) แสงจะกระทำต่อพื้นผิวและกระจายออกทุกทิศทาง

3) การส่องผ่าน (Transmission) ลักษณะที่แสงที่เดินทางจากอากาศไปสู่ตัวกลางที่โปร่งแสง พิจารณาคุณสมบัติหรือลักษณะที่แสงส่องผ่านแล้ว มุมของแสงที่ตกกระทบจะเท่ากับมุมของแสงที่ทะลุผ่านและแสงที่ผ่านมายังคงมีปริมาณเท่าเดิม ปริมาณของแสงที่ตกกระทบจะเท่ากับปริมาณของแสงที่ถูกดูดกลืน และมีบางส่วนจะสะท้อนกลับออกมา ตัวอย่างเช่น จากอากาศภายนอกอาคารสู่กระจกช่องเปิดอาคาร แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับสู่ภายนอกอาคาร และแสงบางส่วนจะหักเหเข้าภายในอาคาร

2.2.3 การโคจรของดวงอาทิตย์

โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา มีลักษณะการโคจรเป็นรูปวงรี ทำมุมกับเส้นตั้งฉาก 23.5 องศา การโคจรรอบดวงอาทิตย์ 1 รอบใช้เวลาโดยประมาณ 365 วัน หรือ 1 ปี ทำให้เกิดช่วงฤดูกาลต่างๆโดยแบ่งการเกิดเป็นช่วง Solstices และ Equinox ดังนี้

1) Summer Solstices เป็นวันที่ขั้วโลกเหนือหันเข้าใกล้ดวงอาทิตย์มากที่สุด เกิดขึ้นในวันที่ 21 มิถุนายน ทำให้มีช่วงเวลากลางวันยาวนานกว่ากลางคืน
2) Winter Solstices เป็นวันที่ขั้วโลกใต้หันเข้าใกล้ดวงอาทิตย์มากที่สุด เกิดขึ้นในวันที่ 21 ธันวาคม ทำให้มีช่วงเวลากลางคืนยาวนานกว่ากลางวัน
3) Equinox เป็นวันที่แกนโลกตั้งฉากกับดวงอาทิตย์ มี 2 วันเกิดขึ้นใน 2 ฤดูกาลคือ Spring Equinox เกิดขึ้นในวันที่ 21 มีนาคม และ Autumn Equinox เกิดขึ้นในวันที่ 21 กันยายน ช่วงเวลาดังกล่าวจะมีระยะเวลากลางวันและกลางคืนเท่ากัน

ตำแหน่งของดวงอาทิตย์มีผลต่อความสว่าง ความเข้มของแสง โดยมุมของดวงอาทิตย์ที่กระทำต่อพื้นที่จะแปรเปลี่ยนไปตามวันและเวลาที่แตกต่างกันออกไป ตำแหน่งการโคจรของดวงอาทิตย์ถือเป็นหลักในการคิดที่สำคัญในการวางทิศทางแนวอาคาร ตำแหน่งช่องเปิด รวมถึงรูปแบบแผงบังแดดในอาคาร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.2.4 สภาพท้องฟ้า (Sky Condition)

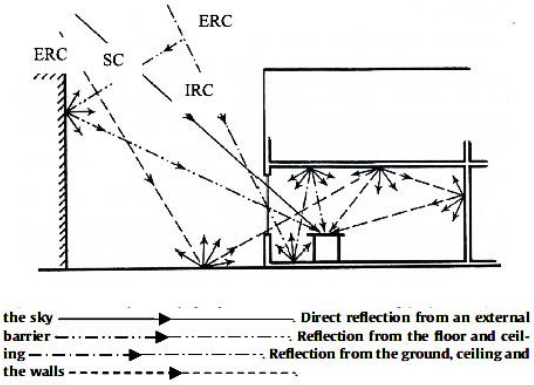
ค่าความสว่างของท้องฟ้าเนื่องมาจากแสงธรรมชาติที่แปรเปลี่ยนตลอดเวลา เป็นผลจากการเปลี่ยนตำแหน่งของดวงอาทิตย์ ปริมาณเมฆและอนุภาคในอากาศ เช่น ฝุ่น ควัน หรือไอน้ำ โดยทั่วไปสามารถแบ่ง ลักษณะท้องฟ้าออกได้ 3 ลักษณะดังนี้

1) สภาพท้องฟ้าโปร่งไม่มีเมฆปกคลุม (Clear Sky) สภาพท้องฟ้าลักษณะนี้เกิดจากองค์ประกอบหลัก 2 อย่าง ได้แก่ แสงกระจายในท้องฟ้า (Diffuse illumination) และ แสงทางตรงจากดวงอาทิตย์ (Direct sunlight) การพิจารณาค่าความส่องสว่างนี้ไม่นับรวมแสงทางตรงจากดวงอาทิตย์ ซึ่งจะมีค่าความส่องสว่าง ระหว่าง 3,000 – 20,000 Lux
2) สภาพท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมบางส่วน (Partly Cloudy Sky) สภาพท้องฟ้าลักษณะนี้ เป็นสภาพท้องฟ้าที่พบได้มากที่สุดตลอดช่วงเวลาตลอดทั้งปีของประเทศไทย (ปุณญวีร์ เต็มธนานันท์, 2554) ซึ่งจะนำมาเป็นสถานการณ์พื้นฐานในการจำลองสภาพแสงสว่าง

3) สภาพท้องฟ้าแบบมีเมฆปกคลุมเต็มท้องฟ้า (Overcast Sky) สภาพท้องฟ้าลักษณะนี้จะมีเมฆปกคลุมทั้งท้องฟ้าจนไม่สามารถมองเห็นแหล่งกำเนิดแสงหรือดวงอาทิตย์ได้ โดยทั่วไปจะใช้ในการหาค่า Daylight Factor ซึ่งในการวิจัยนี้จะไม่ใช้ค่าดังกล่าว

2.2.5 ปัจจัยสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อแสงธรรมชาติ (Nasrollahi and Shokri, 2016)

แสงปริมาณแสงธรรมชาติภายในอาคาร เกิดจากหลายปัจจัยต่างๆกัน โดยใช้คุณสมบัติการสะท้อนของแสง สภาพแวดล้อมรอบๆอาคารและลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ภายในจะส่งผลต่อปริมาณแสงธรรมชาติ ปัจจัยแรกคือความสว่างจากท้องฟ้า (Sky Component, SC) ซึ่งเป็นแสงธรรมชาติทางตรงภายใต้ท้องมีเมฆปกคลุม (Overcast sky) ที่ผ่านทางช่องเปิดเข้าสู่อาคารโดยตรง ปัจจัยที่สองคือความสว่างที่เกิดจากการสะท้อนของภายนอกอาคาร (Exterior Reflectance Component, ERC) คือแสงธรรมชาติที่เกิดจากการสะท้อนของอาคารหรือสภาพแวดล้อมภายนอก เช่น พื้นถนน หรือ เปลือกอาคารข้างเคียง เข้าสู่อาคารผ่านทางช่องแสง และปัจจัยสุดท้ายคือ ความสว่างที่เกิดจากการสะท้อนภายใน (Interior Reflectance Component, IRC) คือแสงธรรมชาติทั้งหมดที่ผ่านช่องแสงเข้าสู่ภายในอาคารและเกิดการสะท้อนไปมาระหว่างพื้นผิวภายในเช่น พื้น ผนัง หรือฝ้าเพดาน ทำให้ทั้งห้องมีความส่องสว่างขึ้น



ภาพที่ 2. 2 สภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อปริมาณแสงธรรมชาติพื้นที่ภายใน

ที่มา: (Nasrollahi et al., 2016)

2.3 ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับแสงประดิษฐ์

2.3.1 หลอดไฟฟ้าที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

- หลอดในตระกูลฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescence) เป็นหลอดที่มีอุณหภูมิสีหลากหลายขึ้นกับชนิดของสารเรืองแสงที่เคลือบภายในผิวของหลอด ปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตสูง รังสิอินฟาเรดต่ำ ให้ความร้อนน้อย เนื่องจากเป็นแสงที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานแสง เนื่องจากไม่ได้เปล่งแสงโดยอาศัยความร้อน จึงมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานมากกว่าและมี

อายุการใช้งานที่ยาวนาน การใช้งานปรกติต้องติดตั้งบัลลาสต์และสตาร์ทเตอร์ เนื่องจากต้องมีการอุ่นไส้หลอดให้ร้อนและใช้แรงดันไฟฟ้าสูงในการจุดหลอดให้ติดตอนแรก ให้แสงแบบกระจาย นิยมใช้คู่กับดวงโคมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้แสงให้ดียิ่งขึ้น

- หลอดในตระกูลคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์ (Compact Fluorescence) หรือหลอดตะเกียบ เป็นหลอดที่มีลักษณะคล้ายหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่พับงอให้มีขนาดเล็กลงเพื่อใช้แทนที่หลอดไส้ธรรมดา แต่ประหยัดพลังงานมากกว่า เมื่อประกอบเข้ากับบัลลาสต์และผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปแล้วจะปล่อยประจุไฟฟ้าออกมาและเรืองแสงขึ้น แสงที่ได้จากหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นแสงกระจายและมีความถูกต้องของแสงสีสูง
- หลอดในตระกูล LED (Lighting Emitting Diode) หรือ หลอดไดโอดเปล่งแสง เป็นอุปกรณ์กึ่งตัวนำ จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่านไปตามอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ ควบคุมการกระจายแสงด้วยเลนส์ที่เคลือบไว้ ทำให้เกิดแสงสว่าง เนื่องจากเป็นแสงที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี จึงไม่มีการแผ่รังสียูวีและอินฟราเรด ส่งผลให้ไม่เกิดการแผ่รังสีความร้อน ประสิทธิภาพส่องสว่างและการประหยัดพลังงานสูง อายุการใช้งานยาวนาน **(**พรรณชลัท สุริโยธิน**,** 2548)

2.3.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพหลอดคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์และหลอด LED

ในปัจจุบันหลอด LED มีราคาลดลงเมื่อเทียบกับในอดีตที่ผ่านมา มีการใช้งานแพร่หลาย ประสิทธิภาพสูง ให้ความปริมาณแสงมากขึ้นโดยที่กินไฟ (วัตต์) น้อยลง นอกจากนี้ยังสามารถใช้แทนหลอดไฟฟ้าดั้งเดิมได้ทันที มีอัตราคืนทุนที่รวดเร็ว ในโครงการขนาดใหญ่ที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูง ควรพิจารณาถึงถึงการเปลี่ยนจากหลอดคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์ดั้งเดิมมาเป็นหลอด LED เพื่อการประหยัดพลังงาน โดยทั่วไปหลอด LED จะให้ประสิทธิผลของแสง (luminous efficiency) ประมาณ 100 lumen/watt โดยสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างหลอดคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์และหลอด LED ได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2. 2 การเปรียบเทียบหลอดคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์เดิมกับหลอด LED ที่พบในท้องตลาด

หลอดคอมแพ็คฟลูออเรสเซนต์		หลอด LED ทดแทน	
กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	ปริมาณแสง (ลูเมน)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	ปริมาณแสง (ลูเมน)
3	100	1	100
7	300	3	300
11	500	5	500
15	700	7	700
19	900	9	900

2.3.3 สมการการคิดค่าไฟฟ้าพื้นฐาน (การไฟฟ้านครหลวง**)**

ปริมาณการใช้ไฟฟ้า (kWh/yr) = $\frac{N \times P \times \text{ชั่วโมงการใช้งาน} \times 365}{1,000}$ ---------- (1)

เมื่อ N = จำนวนดวงโคม

P = กำลังไฟฟ้า **(**วัตต์**)**

2.4 การออกแบบแสงสว่างในอาคารเบื้องต้น

2.4.1 แนวทางการออกแบบแสงสว่างภายในงานสถาปัตยกรรม (สมาคมไฟฟ้าส่องสว่างแห่งประเทศไทย, 2003)

- การให้แสงพื้นฐาน (Ambient / General light) คือการสร้างบรรยากาศด้วยแสงที่ตกกระทบลงบนพื้นผิวฝ้าเพดาน ผนังหรือพื้นที่เพื่อความสว่างกับห้องซึ่งโดยทั่วไปแล้วมักจะเป็นแสงที่ให้ความสม่ำเสมอ
- การให้แสงสว่างเพื่อการใช้งานเฉพาะที่ (Task light) คือการให้ความสว่างในจุดที่ต้องการใช้งาน เช่น โต๊ะอ่านหนังสือ ความสว่างของแสงนั้นควรเป็นไปตามเกณฑ์การส่องสว่างที่กำหนดในพื้นที่ที่ทำกิจกรรมต่างๆ
- การให้แสงที่เน้นส่วนสำคัญ (Focal light) คือการสร้างบรรยากาศด้วยการส่องเน้นเพื่อเพิ่มความเปรียบต่างระหว่างส่วนที่เน้นกับบรรยากาศโดยรวมภายในห้อง
- การให้แสงเพื่อตกแต่ง (Decorative lighting) คือการเพิ่มดวงโคมเพื่อการตกแต่งให้เข้ากับรูปแบบทางสถาปัตยกรรมและช่วยส่องสว่างเพื่อสร้างบรรยากาศและลดความเปรียบต่างภายในห้อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.4.2 แนวทางการออกแบบแสงสว่างในพื้นที่ทางสัญจรในอาคาร (สมาคมไฟฟ้าส่องสว่างแห่งประเทศไทย, 2003)

การให้แสงสว่างพื้นที่ทางสัญจร เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาเนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวมีการใช้งานที่เป็นลักษณะเฉพาะ ควรคำนึงถึงความปลอดภัยและ ตอบสนองการใช้งานและการประหยัดพลังงานเป็นหลัก โดยมีหลักการที่ควรพิจารณาโดยทั่วไปดังนี้

- ในลักษณะพื้นที่ทางเดินห้องพัก ไม่ควรติดตั้งโคมติดผนังยื่นออกมา เนื่องจาก พื้นที่ดังกล่าวมีลักษณะเป็นทางเดินสวนที่มีความกว้างไม่มาก การติดตั้งโคมติดผนังอาจทำให้ไม่สะดวกต่อการสัญจรหรือ เป็นอุปสรรคต่อผู้ทุพลภาพ
- การให้แสงสว่างที่พื้นทางเดินต้องมีการมองเห็นที่ชัดเจนตลอดทั้งความยาวของทางเดินไม่ควรมีเงามาบดบังทัศนะวิสัยการมองเห็น และควรคำนึงถึงความสว่างของผนังทางเดินด้วย
- ควรมีระดับการส่องสว่างตามเกณฑ์กำหนด
- การเลือกใช้ดวงโคมที่มีกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการใช้งาน และควรคำนึงถึงการประหยัดพลังงาน

2.5 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

ความสว่างที่สะท้อนออกมาจากวัตถุ มีหน่วยเป็นแคนเดลาต่อตารางเมตรด้วยปริมาณแสงที่เท่ากันเมื่อตกกระทบลงบนวัตถุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ต่างกันจะมีปริมาณแสงที่สะท้อนออกมาต่างกัน เช่น แสงที่มีปริมาณเท่ากันตกกระทบกับกระดาษสีขาวที่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงสูงและสีดำที่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงต่ำ จะเห็นได้ว่าแสงสะท้อนออกจากกระดาษสีขาวมากกว่าสีดำ ทำให้เรารู้สึกว่ากระดาษสีขาวสว่างกว่ากระดาษสีดำ

2.5.1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุชนิดต่างๆ

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุชนิดต่างๆมีผลต่อความส่องสว่างอย่างมากโดยเฉพาะพื้นที่ภายในอาคาร เช่น พื้นที่ที่มี วัสดุพื้น ผนัง และฝ้าเพดาน ที่มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุมาก จะทำให้สะท้อนความสว่างจากโคมไฟมากขึ้น สามารถลดการใช้ดวงโคมลงได้ โดยระนาบเพดานควรมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่สูง เนื่องจากเป็นส่วนสำคัญในการสะท้อนแสงลงสู่พื้นทำงาน อัตราส่วนสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่นิยมใช้ในพื้นที่ภายในอาคาร คือ เพดาน : ผนัง : พื้น = 70 : 50 : 20

ตารางที่ 2. 3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิววัสดุที่มีสีต่างๆ

สี	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง	สี	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง
ขาว	0.70-0.80	เนื้ออ่อน	0.25-0.35
ครีมอ่อน	0.70-0.80	น้ำตาลอ่อน	0.25-0.35
เหลืองอ่อน	0.55-0.65	เขียว	0.25-0.35
เขียวอ่อน	0.45-0.50	ส้ม	0.20-0.25
ชมพู	0.45-0.50	แดงเข้ม	0.10-0.15
ฟ้าอ่อน	0.40-0.45	น้ำเงินเข้ม	0.10-0.15
เทาอ่อน	0.40-0.45	ดำ	0.04

ที่มา: (ชำนาญ ห่อเกียรติ, 2540)

2.5.2 การใช้ค่า Light Reflectance Value (LRV)

ปัจจุบันสามารถทราบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของสีได้จากค่า Light Reflectance Value หรือ LRV ซึ่งจะแสดงให้เห็นอยู่ที่ด้านหลังของผลิตภัณฑ์สี ซึ่งแสดงค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวในทุกทิศทาง ทุกคลื่นแสงเมื่อได้รับแสงจากแหล่งกำเนิดแสง

ภาพที่ 2. 3 แสดงช่วงการสะท้อนตามมาตรฐานของ LRV

ที่มา : (Sawaya, 2005)

โดยค่า LRV จะบ่งบอกถึงความสามารถในการสะท้อนแสงของพื้นผิวสีนั้นๆ โดยค่า 0% จะเป็นค่าของสีดำในอุดมคติ และ 100% จะเป็นค่าของสีขาวในอุดมคติ ซึ่งไม่สามารถพบไม่จริงในชีวิตประจำวัน (Sawaya, 2005)

2.6 การใช้งานอุปกรณ์ควบคุมการหรี่ไฟอัตโนมัติ daylight sensor และ motion sensor

ในปัจจุบันมีอุปกรณ์หลายประเภทที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของหลอดไฟและดวงโคมได้ โดยมีเป้าหมายคือการลดค่าการใช้พลังงานของอุปกรณ์ในขณะที่ประสิทธิภาพการให้แสงยังอยู่ในระดับมาตรฐาน เช่น อุปกรณ์ควบคุมความสว่างของดวงโคมด้วยแสงธรรมชาติชนิดปรับหรี่ได้ (daylight sensor) หรือ อุปกรณ์ควบคุมความสว่างของดวงโคมชนิดเซนเซอร์วัดผู้ใช้งาน (motion sensor) เป็นต้น จากการศึกษาเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าแสงสว่าง เมื่อมีการใช้อุปกรณ์ปรับความสว่างด้วยแสงธรรมชาติอัตโนมัติ (daylight sensor) ภายในห้องสำนักงานจำลอง พบว่าจะสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าเมื่อเทียบกับระบบทั่วไปเพิ่มขึ้นถึง 48-62% แต่เนื่องด้วยงานวิจัยดังกล่าวเป็นการศึกษาในห้องทำงานขนาดเล็ก งานวิจัยชิ้นนี้จะศึกษาเพิ่มเติมในการใช้งานของระบบดังกล่าวในพื้นที่ที่มีลักษณะทางกายภาพเป็นทางเดินที่ยาวแบบทางสัญจรหน้าห้องพัก (รุ่งทิพย์ พูนอัศวสมบัติ, 2553)

การใช้ระบบเซนเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหว (motion sensor) ทดลองประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานไฟฟ้าส่องสว่าง พื้นที่ทางเดิน Bainer Hall ภายใน University of California, Davis พบว่ามีการประหยัดพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประมาณ 40-50% เมื่อเทียบกับกรณีฐาน เทคโนโลยีนี้เป็นวิธีที่น่าสนใจเนื่องจากพฤติกรรมผู้ใช้งานของพื้นที่ทางเดินระหว่างห้องพักคอนโดมิเนียม มีการใช้งานที่หนาแน่นเฉพาะบางช่วงเวลาเท่านั้น การใช้งานอุปกรณ์ดังกล่าวจะสามารถลดการใช้พลังงานในช่วงเวลาอื่นที่มีการใช้งานอย่างเบาบางได้ (Siminovitch, 2009)

2.6.1 การทำงานของอุปกรณ์ควบคุมแสงสว่างด้วยแสงธรรมชาติ (daylight sensor)

อุปกรณ์ควบคุมความสว่างของดวงโคมด้วยแสงธรรมชาติ ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ส่วนรับความสว่าง (photo sensor) ส่วนควบคุมความสว่าง (lighting control) และส่วนควบคุมการปรับระดับความสว่าง (electronic dimming ballast) โดยมีรายละเอียดการทำงานของอุปกรณ์ดังนี้

1) ส่วนรับความสว่าง (photo sensor) ลักษณะจะเป็นเซ็นเซอร์ที่อ่านค่าความสว่างบริเวณนั้นๆ ติดตั้งบนเพดาน อุปกรณ์จะมีการอ่านค่าเหมือนเลนส์ตาปลา มองลงพื้นที่ทำงานโดยรอยตำแหน่งที่ทำการติดตั้ง โดยค่าความสว่างที่อ่านได้จะเป็นค่าของความสว่างในระดับพื้นที่ทำงาน (work plane) คุณภาพของตัวเซนเซอร์จะเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของความละเอียดในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงระดับของแสงธรรมชาติ ตัวอย่างเช่น หากเป็นรุ่นที่ใช้งานทั่วไป จะสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงระดับแสงธรรมชาติได้ตั้งแต่ 5 -10 lux แต่หากเป็นรุ่นที่มีประสิทธิภาพสูงจะสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงระดับแสงธรรมชาติได้ตั้งแต่ 1-5 lux
2) หลังจากวัดค่าความสว่างของพื้นที่ทำงานได้ ค่าดังกล่าวจะถูกส่งสัญญาณไปที่ ส่วนควบคุมความสว่าง (lighting control) แปลงเป็นสัญญานอนาลอกไปยัง ส่วนควบคุมการปรับระดับความสว่าง (electronic dimming ballast) ซึ่งสามารถตั้งค่าการใช้งานชุดคำสั่งได้ว่าให้ตอบสนองต่อความสว่างที่ระดับเท่าไร
3) ในกรณีที่เป็นสวิตซ์แบบเปิด – ปิด เมื่อค่าความสว่างมากกว่าค่าที่กำหนดไว้ จะมีสัญญาณส่งไปยังสวิตซ์ให้ปิดดวงโคมอัตโนมัติ และหากน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้จะมีคำสั่งส่งไปยังสวิตซ์ให้เปิดดวงโคม
4) ในกรณีที่ที่ใช้อุปกรณ์แบบปรับระดับความสว่างได้ เมื่อค่าความสว่างมากกว่าค่าที่กำหนดไว้จะมีสัญญาณส่งไปยังสวิตซ์ให้หรี่ไฟ และหากน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้จะมีคำสั่งส่งไปยังสวิตซ์ให้หรี่ไฟชดเชยแสงธรรมชาติ สามารถควบคุมระดับความสว่างได้ตั้งแต่ 10% – 100% โดยชนิดของหลอดไฟที่สามารถใช้งานกับระบบหรี่ไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพคือหลอด LED

2.6.2 การทำงานของอุปกรณ์เซนเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหว (motion sensor)

อุปกรณ์ควบคุมความสว่างของดวงโคมด้วยแสงธรรมชาติ ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ส่วนตรวจจับการเคลื่อนไหว (occupancy sensor) ส่วนควบคุมความสว่าง (lighting control) และส่วนควบคุมการปรับระดับความสว่าง (electronic dimming ballast) โดยมีรายละเอียดการทำงานของอุปกรณ์ดังนี้

1) ส่วนตรวจจับการเคลื่อนไหว (occupancy sensor ลักษณะจะเป็นเซนเซอร์ที่ตรวจจับการเคลื่อนไหวบริเวณนั้นๆ ติดตั้งบนเพดาน อุปกรณ์จะมีลักษณะเหมือนเลนส์ตาปลา มองลงโดยรอยตำแหน่งที่ทำการติดตั้ง คุณภาพของตัวเซนเซอร์จะเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของความละเอียดในการตรวจจับการเคลื่อนไหว ตัวอย่างเช่น หากเป็นรุ่นที่ใช้งานทั่วไปจะสามารถตรวจจับการการเคลื่อนไหวได้เพียงการเคลื่อนไหวในลักษณะที่มีการเคลื่อนที่ผ่าน แต่หากเป็นรุ่นที่มีประสิทธิภาพสูงจะสามารถตรวจจับการเคลื่อนไหวได้ละเอียดถึงการเคลื่อนอวัยวะของร่างกายเพียงเล็กน้อย
2) เมื่อไม่มีผู้ใช้งาน ส่วนควบคุมความสว่าง (lighting control) จะควบคุมและแปลงเป็นสัญญานอนาลอกไปยัง ส่วนควบคุมการปรับระดับความสว่าง (electronic dimming ballast) ให้หรี่

ไฟตามระดับความสว่างขั้นต่ำที่กำหนดไว้โดยสามารถควบคุมระดับความสว่างได้ตั้งแต่ 10% – 100% หรือปิดดวงโคม

3) หลังจากตรวจจับการเคลื่อนไหวได้โดย ส่วนตรวจจับการเคลื่อนไหว (occupancy sensor) ค่าดังกล่าวจะถูกส่งสัญญาณไปที่ ส่วนควบคุมความสว่าง (lighting control) จะควบคุมและแปลงเป็นสัญญานอนาลอกไปยัง ส่วนควบคุมการปรับระดับความสว่าง (electronic dimming ballast) ให้เพิ่มปริมาณแสงจากดวงโคมได้ตามระดับความสว่างที่ต้องการโดยสามารถควบคุมระดับความสว่างได้ตั้งแต่ 10% – 100%

2.6.3 การเลือกใช้งานอุปกรณ์ควบคุมความสว่างดวงโคม

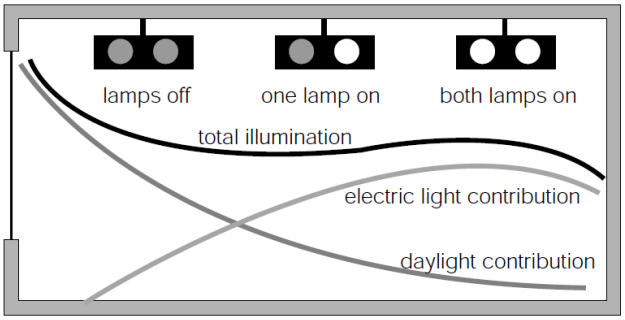
การใช้เทคโนโลยีการควบคุมการหรี่ไฟอัตโนมัติในปัจจุบัน เซ็นเซอร์ 1 ชิ้น สามารถใช้งานได้ทั้ง 2 ระบบ คือทั้ง daylight sensor และ motion sensor โดยการใช้งานควรคำนึงถึงความละเอียดของการใช้งาน และการแบ่งบริเวณควบคุม

2.6.4 การแบ่งบริเวณควบคุม (zoning)

1) ควรแบ่งการควบคุมดวงโคมด้วยพื้นที่ที่มีปริมาณแสงธรรมชาติใกล้เคียงกัน และลักษณะการใช้งานของพื้นที่ใกล้เคียงกัน เช่น โถงลิฟต์ พื้นที่ทางเดินตามยาวของทางสัญจรหน้าห้องพัก

2) ไม่ควรแบ่งการควบคุมย่อยมากเกินไป เนื่องจากการแบ่งบริเวณควบคุมมากขึ้นจะมีค่าใช้จ่ายด้านอุปกรณ์มากขึ้น แต่ถ้าแบ่งเป็นบริเวณที่กว้างเกินไป อาจทำให้บางพื้นที่ทำงานได้อย่างไม่มีประสิทธิภาพ จึงควรออกแบบบริเวณการติดตั้งอุปกรณ์ให้เหมาะสม

3) ในบริเวณติดหน้าต่างหรือช่องเปิดที่เป็นทางสัญจร ควรแยกการคอบคุมดวงโคมบริเวณนี้ เพื่อที่ระดับแสงธรรมชาติมีมากเกินความจำเป็นแล้ว จะสามารถปิดดวงโคมที่เกินความจำเป็นได้ (O'Connor, 2008)



ภาพที่ 2. 4 แสดงตัวอย่างการโซนการควบคุมของพื้นที่ที่มีช่องเปิดรับแสงธรรมชาติ

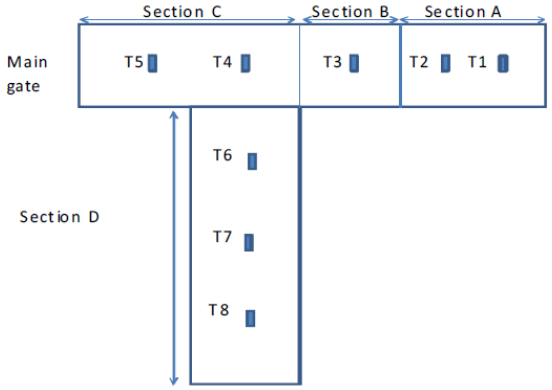
ที่มา : (O'Connor, 2008), Tips for daylighting with windows, California Institute for technology Efficiency

จากภาพที่ 2.4 แสดงตัวอย่างการโซนการควบคุมของพื้นที่ที่มีช่องเปิดรับแสงธรรมชาติ อธิบายถึงกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความสว่างบริเวณต่างๆภายในห้อง สังเกตว่าแสงธรรมชาติจะค่อยๆลดลงเมื่อระยะที่วัดห่างช่องเปิดมากขึ้น และการใช้พลังงานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะที่วัดห่างจากช่องเปิดมากขึ้น โดยจะควบคุมการเปิด-ปิดดวงโคมให้มีระดับความส่องสว่างตามเกณฑ์ที่กำหนด

2.6.5 การทบทวนวรรณกรรมถึงแนวทางการศึกษาวิจัยอุปกรณ์ daylight sensor และ motion sensor

ใช้วิธีการพิจารณาโดยนำแนวทางมาจากงานวิจัย Energy Efficiency Lighting Control Systems Design For Corridor illumination (Gangali and Shaligram, 2012) โดยงานวิจัยชิ้นนี้ได้ศึกษาถึงวิธีการพิจารณาการใช้งานของเซนเซอร์การประหยัดพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างชนิดต่างๆ ทั้ง daylight sensor และ motion sensor ทั้งระบบอัตโนมัติและระบบ manual ให้เหมาะสมกับการใช้งานในพื้นที่ทางสัญจรในอาคาร คณะวิทยาศาสตร์ University of Pune ประเทศอินเดีย และวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพการใช้งานของอุปกรณ์

สิ่งที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับวิธีนี้คือวิธีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับระบบการอุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิด โดยเบื้องต้น ทางผู้วิจัยได้ทำการแบ่งพื้นที่ของทางสัญจรที่ทำการศึกษาออกเป็นส่วนๆ ตามรูปแบบการใช้งาน จากนั้นได้ทำการพิจารณาและสังเกตพฤติกรรมผู้ใช้งานในพื้นที่ว่าช่วงเวลานั้นมีการใช้งานที่หนาแน่นเท่าไร และวิเคราะห์จำนวนดวงโคม ปริมาณแสงสว่างที่ต้องการใช้งานตามพฤติกรรมผู้ใช้พื้นที่



Zone	Timing	No.of luminaires required
Fringe Hours	8 am – 10 am (in morning)	8
Working Hours	10 am – 6 pm	6
Fringe Hours	6 pm – 7 pm (in evening)	8
Non working Hours	7 pm – 8 am	4

ภาพที่ 2. 5 (ซ้าย) แสดงการแบ่งพื้นที่ของทางสัญจรที่ทำการศึกษาออกเป็นส่วนๆ ตามรูปแบบการใช้งาน
ภาพที่ 2. 6 (ขวา) แสดงการพิจารณาความต้องการใช้ดวงโคมในแต่ละช่วงเวลา

ที่มา : (Gangali et al., 2012)

การวิเคราะห์จำนวนดวงโคมที่ต้องการใช้งานตามช่วงเวลา ทางผู้วิจัยได้ศึกษาถึงจำนวนช่วงเวลาระหว่างวัน ยกตัวอย่างเช่น ฤดูร้อน มีจำนวน 122 วันใน 1 ปี แสงธรรมชาติเริ่มมีอิทธิพลตั้งแต่เวลา 10.00 น. – 18.00 น. และช่วงเวลาพลบค่ำคือช่วงเวลา 18.00 – 19.00 น. จากนั้นไปจะไม่มีอิทธิพลจากแสง

ธรรมชาติ ดังที่สังเกตได้ดังภาพที่ 2.7 จากนั้นจะคำนวณหาชุดคำสั่งในการลดการใช้ดวงโคมหรือหรี่ไฟในตำแหน่งต่างๆจากการสังเกต โดยช่วงเวลาที่กล่าวไว้ข้างต้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งที่ตั้งของประเทศที่ทำการศึกษา โดยจะนำแนวทางของวิธีการศึกษาวิจัยมาประยุกต์ให้เข้ากับงานวิจัยนี้

Season	No. of days in a year	Availability of light		
		Daylight	Twilight	No light
Summer	122 days	10 am – 6pm	6 pm – 7 pm	7 pm – 7 am
Winter	122 days	10 am – 6pm	6 pm – 7 pm	7 pm – 7 am
Rainy	56 days (similar to summer)	10 am – 6pm	6 pm – 7 pm	7 pm – 7 am
Rainy1	56 days (similar to winter)	10 am – 6pm	6 pm – 7 pm	7 pm – 7 am
Rainy2	9 days (cloudy days)	No sufficient daylight 10am – 7 p m		7 pm – 7 am

ภาพที่ 2. 7 แสดงขอบเขตการแบ่งฤดูกาล จำนวนวัน และช่วงเวลา ในการศึกษาวิจัย

ที่มา : (Gangali et al., 2012)

2.7 งานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพแสงธรรมชาติเบื้องต้น

วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพแสงธรรมชาติ มีอยู่หลายวิธีที่ศึกษาได้จากการทบทวนวรรณกรรม เช่น การใช้ท่อนำแสงสามารถเพิ่มความส่องสว่างในพื้นที่ส่วนลึกที่ห่างจากช่องเปิดหน้าต่างได้ (Mostofa, n.d.) แต่จะไม่แสดงประสิทธิภาพในวันที่สภาพท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมมาก และต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้ง ซึ่งไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในพื้นที่ทางเดินหน้าห้องพักที่มีระดับฝ้าเพดานที่ต่ำ ส่วนการใช้หิ้งสะท้อนแสงภายในร่วมกับแผงสะท้อนแสง (ไกรฤทธิ์ ฤกษ์เกษม, 2553) และการใช้หิ้งสะท้อนแสงภายในร่วมกับฝ้าเพดานลาดเอียง (ผการัตน์ โกศัลล์ประไพ, 2551) สามารถเพิ่มความลึกของแสงธรรมชาติได้ แต่ทั้ง 2 แนวทางนี้ต้องใช้ติดตั้งที่ระดับความสูง 2.20 เมตรขึ้นไป รวมถึงระดับฝ้าเพดานต้องมีความสูงเกินกว่า 2.75 เมตร จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในพื้นที่ทางเดินหน้าห้องพักที่มีระดับฝ้าเพดานที่ต่ำ

ด้วยลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักเป็นทางเดินที่ยาว ฝ้าเพดานต่ำ มีช่องเปิดรับแสงธรรมชาติอยู่ที่บริเวณสุดทางเดินและโถงลิฟต์ โดยแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพแสงธรรมชาติที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น สามารถเพิ่มได้เฉพาะพื้นที่ใกล้ช่องเปิดเท่านั้น ไม่ส่งผลต่อส่วนลึกของพื้นที่ทางเดินได้ หากพิจารณาถึงลักษณะทางเดินที่ยาวมากและแคบนั้น การศึกษาแค่ส่วนบริเวณช่องเปิดในทางเศรษฐศาสตร์จะดูไม่คุ้มค่า การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงจึงเป็นสิ่งที่ควรจะนำมาพิจารณา เนื่องจากจะส่งผลให้ประสิทธิภาพแสงธรรมชาติบริเวณช่องเปิดเพิ่มมากขึ้นและระดับความสว่างโดยรวมของพื้นที่เพิ่มมากขึ้นด้วย (E_{av}) วิธีดังกล่าวจึงเป็นวิธีที่ควรนำมาศึกษาในการเพิ่มประสิทธิภาพความสว่างในงานวิจัยนี้

2.7.2 การเพิ่มประสิทธิภาพความสว่างโดยการเพิ่มค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวในอาคาร

2.7.2.1 การใช้แสงธรรมชาติเสริมเพื่อลดพลังงานในอาคาร : กรณีศึกษาอาคารในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (คมกฤช ชูเกียรติมั่น, 2540)

ได้ศึกษาถึงวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพแสงธรรมชาติในอาคารกรณีศึกษาของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยการสำรวจอาคารอย่างละเอียด เก็บข้อมูล การวางผังไฟ ชนิดของหลอด ค่าสะท้อนแสงของพื้นผิว ค่า DF ณ จุดต่างๆ โดยการวัดค่าจริง และใช้วิธีการคำนวณค่าความส่องสว่างจากสูตร lumen method, DF, point by point และ zonal cavity ในแต่ละพื้นที่ของอาหาร เพื่อหา 1. รูปแบบแผงบังแดดที่เหมาะสม 2. การวางผังไฟที่เหมาะสม 3. การเลือกชนิดดวงโคมที่เหมาะสม 4. กระปรับปรุงค่าสะท้อนแสงของวัสดุ 5. พิจารณาค่า DF ที่มีผลต่อการปิดไฟ และคิดคำนวณการลดการใช้พลังงาน โดยจากการจากการทบทวนวรรณกรรม จะมุ่งเน้นศึกษาในส่วนของ การปรับปรุงค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในอาคาร โดยผลการวิจัยได้แสดงให้เห็นว่าแนวทางดังกล่าวสามารถเพิ่มปริมาณแสงธรรมชาติได้มากถึง 58% จากกรณีฐาน อีกทั้งยังสามารถเพิ่มการสะท้อนแสงประดิษฐ์ ส่งผลให้ความสว่างโดยรวมของพื้นที่เพิ่มมากขึ้น สามารถลดอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าแสงสว่างได้ถึง 44.5% หรือเท่ากับ 13% เมื่อเทียบกับอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดของอาคาร

2.7.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในอาคารกับประสิทธิภาพการใช้อุปกรณ์ควบคุมความสว่างของดวงโคมด้วยแสงธรรมชาติ (รุ่งทิพย์ พูนอัศวสมบัติ, 2553)

ได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่มีผลต่อความสว่างในพื้นที่สำนักงานจำลองกรณีศึกษา และนำมาพิจารณาร่วมกับประสิทธิภาพการใช้งานอุปกรณ์ควบคุมความสว่างของดวงโคมด้วยแสงธรรมชาติ โดยการจำลองพื้นที่สำนักงานที่ทำการศึกษาโดยการใช้ดวงโคมส่องสว่าง หลอดฟลูออเรสเซนต์ T8 ขนาด 36W และกำหนดให้พื้นที่ดังกล่าวมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในตั้งแต่ 0.10 – 0.90 นำค่าความสว่างที่ได้ในแต่ละช่วงเวลา และสถานการณ์ที่มีอัตราค่าสะท้อนแสงต่างๆกันมาวิเคราะห์ถึงการประหยัดพลังงานเมื่อมีการใช้อุปกรณ์ควบคุมความสว่างของดวงโคมด้วยแสงธรรมชาติ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ห้องที่มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในมากจะส่งผลให้ระดับความสว่างภายในห้องเพิ่มมากขึ้น และจะมีอัตราค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าแสงสว่างต่ำกว่าห้องที่มีอัตราค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในน้อย

2.7.2.3 การนำแสงธรรมชาติมาใช้ในอาคารพักอาศัยประเภททางเดินกลาง กรณีศึกษา: จังหวัดขอนแก่น (พัชริยา ชินฮาต, 2553)

ได้ศึกษาถึงการนำแสงธรรมชาติมาใช้ในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักอาคารพักอาศัยในจังหวัดขอนแก่นจากเดิม โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการศึกษา 2 ส่วนคือ 1. การทดสอบประสิทธิภาพแสงสว่างเมื่อมี

การเพิ่มช่องแสงทางด้านข้าง โดยการจัดตำแหน่งช่องเปิดที่เหมาะสม และ 2. คือการเพิ่มประสิทธิภาพแสงธรรมชาติโดยศึกษาถึงลักษณะทางกายภาพของทางเดินกลาง โดยการศึกษาถึงตำแหน่งและทิศทางของช่องเปิดและการทดสอบการเพิ่มค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวภายใน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมุ่งศึกษาถึงเรื่องดังกล่าว ผลการวิจัย แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง จากฝ้าเพดาน 70% เพิ่มขึ้นเป็น 80% ผนังจากเดิม 50% เพิ่มขึ้นเป็น 70% พื้นจากเดิม 20% เพิ่มขึ้นเป็น 50% จะทำให้ความสว่างเพิ่มขึ้นประมาณ 25 – 30 lux โดยวิธีดังกล่าวเป็นทางเลือกในการเพิ่มความสว่างของพื้นที่ภายในด้วยวิธีทางกายภาพที่ดีที่สุดได้มากกว่าทางเลือกในการออกแบบอื่นๆ

2.8 สรุปทฤษฎีและวิธีวิจัยที่นำไปใช้ในการศึกษา

จากการศึกษาถึงเกณฑ์แสงสว่างของ IESNA, สมาคมไฟฟ้าส่องสว่างแห่งประเทศไทย และกฎกระทรวงแรงงาน พ.ศ. 2549 พบว่า พื้นที่ทางสัญจรในอาคารการใช้งานปรกติกำหนดเกณฑ์ไว้ที่ 50 lux ส่วนพื้นที่ทางสัญจรแบบเบาบาง กฎกระทรวงแรงงาน พ.ศ. 2549 กำหนดเกณฑ์ไว้ที่ 20 lux

จากการศึกษาถึงการโคจรรอบดวงอาทิตย์ที่มีผลต่อระดับแสงธรรมชาติ จะนำองค์ความรู้ดังกล่าวมากำหนดสถานการณ์แสงสว่างที่จะใช้จำลองในงานวิจัยนี้ จะเลือก 2 วันสำคัญ คือ ช่วงเวลา winter solstice ที่มีช่วงเวลากลางวันสั้นที่สุด และช่วงเวลา summer solstice เพื่อนำผลการวิจัยไปรับรองช่วงเวลาอื่นๆ ตลอดทั้งปีได้ โดยจะทำการจำลองภายใต้สภาพท้องฟ้าแบบมีเมฆปกคลุมบางส่วน (partly cloudy) ที่เป็นสภาพท้องฟ้าที่พบได้มากที่สุดในช่วงเวลาตลอดทั้งปีของประเทศไทย (ปุณญวีร์ เต็มธนานันท์, 2554)

การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิว จะศึกษาจากตารางแสดงช่วงการสะท้อนแบบ LRV (Sawaya, 2005) เปรียบเทียบกับตารางที่ 2.4 ที่แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุต่างๆ (ชำนาญ ห่อเกียรติ, 2540) ในการกำหนดขอบเขตของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวที่ใช้ในงานวิจัย

เมื่อพิจารณาถึงการใช้อุปกรณ์ daylight sensor จะใช้วิธีการแบ่งพื้นที่ (zoning) ที่ได้รับแสงธรรมชาติตามแนวทางของ O' Connor ส่วนการใช้อุปกรณ์ motion sensor ใช้วิธีการพิจารณาโดยนำแนวทางมาจากงานวิจัยของ Gangali และ Shaligram ในการกำหนดพื้นที่และพฤติกรรมการใช้งานในแต่ละช่วงเวลา

2.9 ช่องว่างในงานวิจัยจากการทบทวนวรรณกรรม

จากการทบทวนงานวิจัยที่มีผู้เคยศึกษาเรื่องที่เกี่ยวข้องกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง พบว่า งานวิจัยของ รุ่งทิพย์ พูนอัศวสมบัติ เมื่อปี 2553 ได้ทำการทดสอบการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่มีค่าต่างๆกันกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ T8 ขนาด 36W เพียงชนิดเดียว และได้ทำการศึกษาวิจัยที่ห้องทำงานกรณีศึกษาที่มีพื้นที่ไม่กว้าง ระนาบทำงานอยู่ที่ระดับ 0.75 ในงานวิจัยชิ้นนี้จะศึกษาเพิ่มเติมถึงการใช้หลอดไฟที่มีประสิทธิภาพต่างๆกันและศึกษาในพื้นที่ที่มีลักษณะทางกายภาพเป็นทางเดินที่ยาว ระนาบนำงานอยู่ที่พื้นทางเดิน อีกทั้งงานวิจัยของ คมกฤช ชูเกียรติมั่น เมื่อปี 2540 ไม่ได้ทำการทดสอบในพื้นทีทาง

สัญจรหน้าห้องพักที่เป็นทางเดินที่ยาว และยังไม่มีการพิจารณาร่วมกับ daylight sensor และ motion sensor รวมถึงการใช้งานร่วมกับหลอดไฟที่มีประสิทธิภาพสูง

งานวิจัยของ พัชริยา ชินฮาต เมื่อปี 2553 ได้ศึกษาถึงแนวทางการเพิ่มความสว่างจากแสงธรรมชาติ ไม่ได้ศึกษาถึงความสว่างของแสงประดิษฐ์ที่มีอิทธิพลต่อพื้นที่ และการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงแสงของพื้นผิวภายในเป็นหนึ่งในตัวเลือกที่นำมาศึกษาวิจัย แต่ได้ทำการทดสอบเพียงค่าเดียว ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวภายใน ในช่วงที่สามารถพบได้ในการใช้งานจริง และพิจารณาร่วมกับการทดสอบแสงประดิษฐ์ที่มีประสิทธิภาพต่างๆกัน

จากการทบทวนวรรณกรรมถึงงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ายังมีช่องว่างของงานวิจัย เนื่องจากยังไม่มีงานวิจัยชิ้นใดที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพแสงสว่างใน โดยการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง พิจารณาร่วมกับปริมาณแสงจากหลอดไฟ ในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักของอาคารคอนโดมิเนียม และศึกษาต่อถึงการใช้งานอุปกรณ์ daylight sensor และ motion sensor เพื่อการประหยัดพลังงานและลดค่าใช้จ่ายไฟฟ้า จึงมีความเหมาะสมที่จะนำองค์ความรู้ที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมมาศึกษาต่อยอดเพิ่มเติมในวิจัยชิ้นนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้วิธีดำเนินงานวิจัยเชิงจำลองสถานการณ์ (Simulation Research) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพแสงสว่างในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักเพื่อการประหยัดพลังงาน พิจารณาร่วมกับอุปกรณ์ควบคุมการหรี่ไฟ daylight sensor และ motion sensor เพื่อหาประสิทธิภาพการประหยัดพลังงาน

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ภาพที่ 3. 1 เครื่องวัดความส่องสว่าง Lux meter รุ่น LT Lutron LX-1108

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ใช้ในการดำเนินการวัดแสงสว่างภายในโครงการตัวอย่าง 5 โครงการ โดยการใช้ lux meter ที่ระนาบทำงานระดับพื้นอาคาร ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของพื้นที่ทางเดิน ทุกๆ 1 เมตร ระหว่างเวลา 10.00 – 14.00 น. ช่วงเดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคม ค่าที่ได้จะเป็นผลรวมค่าความส่องสว่างของแสงธรรมชาติและแสงประดิษฐ์ (lux)

3.2 ทบทวนกฎหมาย ข้อบังคับ และเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ประกอบด้วย การทบทวนเกณฑ์ ข้อกำหนด และแนวทางการออกแบบระบบแสงสว่างในพื้นที่ทางสัญจรในอาคารที่ยอมรับในระดับสากล ได้แก่ illumination Engineering Society of North America (IESNA), สมาคมไฟฟ้าส่องสว่างแห่งประเทศไทย (TIEA) และ กฎกระทรวงแรงงาน พ.ศ. 2549 ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2

3.3 สำรวจอาคารตัวอย่างเพื่อเก็บข้อมูลทางกายภาพและลักษณะแสงสว่างเกิดขึ้น

การศึกษาพื้นที่ทางเดินห้องพักอาคารตัวอย่างในเขตกรุงเทพฯและปริมณฑลของ บริษัท พฤกษา เรียล เอสเตท จำกัด จำนวน 5 แห่ง (ดูภาคผนวก ก.) เพื่อทราบถึงปัญหาแสงสว่างและสามารถวิเคราะห์เลือกโครงการที่จะนำมาศึกษาเป็นกรณีฐานในงานวิจัย

1. โครงการ The Tree, Interchange
2. โครงการ Plum condominium, Paholyothin 89
3. โครงการ Urbano by Absolute
4. โครงการ Signature By Urbano
5. โครงการ The Tree, Bang Po

ภาพที่ 3. 2 โครงการตัวอย่างที่ทำการศึกษา

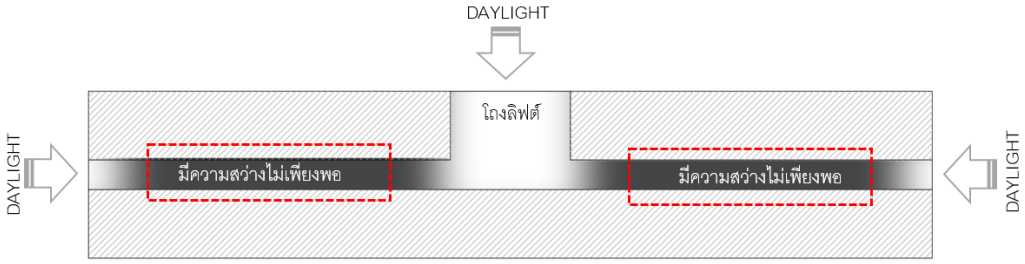
โครงการ The Tree, Interchange (ซ้าย) โครงการ Plum condominium, Paholyothin 89 (กลาง) โครงการ Urbano by Absolute (ขวา)

ภาพที่ 3. 3 โครงการตัวอย่างที่ทำการศึกษา

โครงการ Signature By Urbano (ซ้าย) โครงการ The Tree, Bang Po (ขวา)

จากการเข้าสำรวจโครงการเพื่อทราบถึงรูปแบบของแสงสว่างและปัญหาที่เกิดขึ้นทุกๆโครงการ สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

- บริเวณช่องเปิดหน้าต่างสุดปลายทางเดิน แสงธรรมชาติจะเข้าสู่พื้นที่ภายในได้เพียงระยะสั้นๆ ไม่สามารถเข้าสู่ส่วนลึกของพื้นที่ทางเดินได้ (ภาพที่ 3.4)



ภาพที่ 3. 4 แผนภาพแสดงลักษณะแสงสว่างที่เกิดขึ้นในพื้นที่ทางเดินห้องพักที่ได้ทำการเข้าสำรวจ

- ระดับความส่องสว่างในส่วนลึกของอาคารจากแสงประดิษฐ์ไม่เพียงพอตามเกณฑ์
- ทุกโครงการยังไม่มีเทคโนโลยีการจัดการแสงสว่างและมีการเปิดแสงไฟฟ้าทิ้งไว้ตลอดทั้งวัน โดยไม่พิจารณาถึงประโยชน์ของแสงธรรมชาติ
- ทุกโครงการยังมีการเลือกชนิดของหลอดไฟที่มีปริมาณแสงไม่เพียงพอต่อการใช้งาน

3.4 ขั้นตอนการกำหนดกรณีฐานในงานวิจัยเพื่อสร้างแบบจำลองทดสอบประสิทธิภาพแสงสว่าง

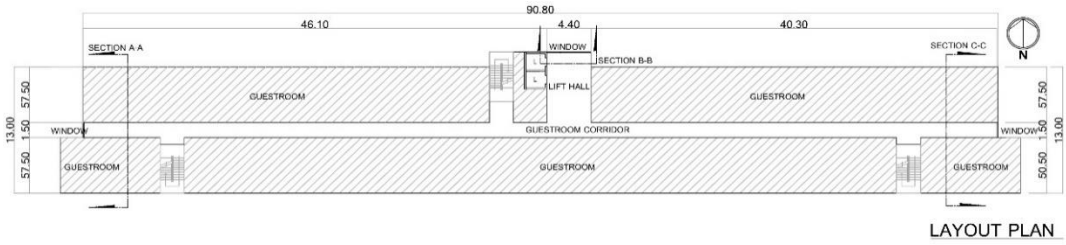
3.4.1 การกำหนดกรณีฐานในงานวิจัย

โครงการ Plum Condominium สามารถเป็นกรณีฐานในการศึกษาวิจัยได้ เนื่องจากโครงการนี้มีจำนวนห้องพักมาก ประมาณ 5,000 ยูนิต ซึ่งพื้นที่โดยรวมมากกว่าโครงการอื่น มีการวางผังซ้ำกันทุกชั้นที่ค่อนข้างสมมาตรกัน พื้นที่ทางเดินมีความยาวที่สุด คือ 90.00 เมตร มีช่องเปิดหน้าต่างสุดปลายทั้ง 2 ด้าน มีเพียงการใช้แสงประดิษฐ์จากดวงโคมส่องสว่างทั่วไป (general lighting) ไม่มีการใช้ไฟตกแต่ง (decorative lighting) หรือไฟหลืบซ่อน (cove light) เพื่อความสวยงาม จึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาเป็นกรณีฐานในการศึกษาวิจัย

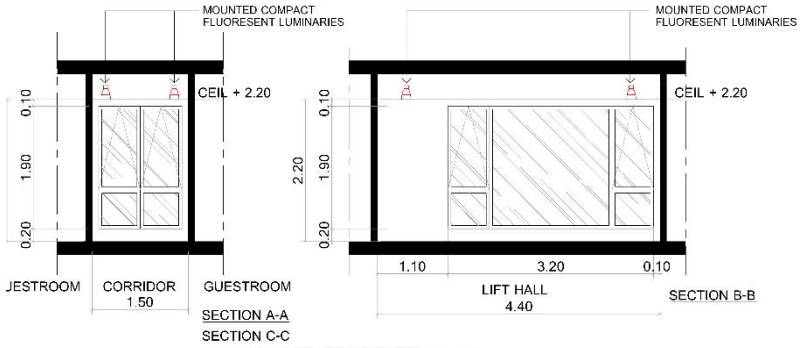
3.4.2 การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพแสงสว่าง

ในขั้นตอนนี้จะทำการศึกษาอัตราค่าสะท้อนแสงของวัสดุภายในกับการเลือกปริมาณแสงจากหลอดไฟประดิษฐ์ที่เหมาะสมต่อความสว่างในพื้นที่ทางเดินหน้าห้องพัก โดยได้จำลองพื้นที่ทางเดินหน้าห้องพักจาก โครงการ Plum Condominium ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ DIALux 4.12 และจำลองสภาพเหมือนจริงของแสงธรรมชาติที่ผ่านเข้ามาในอาคารเพื่อเก็บข้อมูลปริมาณความสว่างที่เกิดขึ้นของพื้นที่ที่มีอัตราค่าสะท้อนของพื้นผิวภายในต่างกันและดวงโคมที่ให้ปริมาณแสงต่างกัน

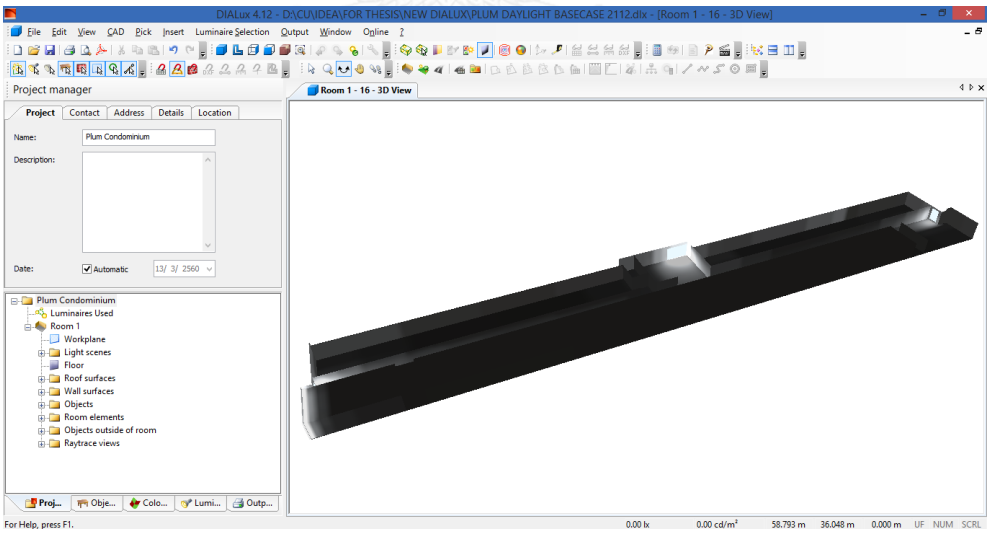
พื้นที่ทางเดินห้องพักที่ทำการศึกษา มีขนาด (W x L x H) = 95.00 x 1.50 x 2.20 เมตร มีช่องเปิดหน้าต่างบริเวณโถงลิฟต์และสุดปลายทางเดินทั้งสองด้าน (ภาพที่ 3.5)



ภาพที่ 3. 5 แสดงผังอาคาร Plum condominium



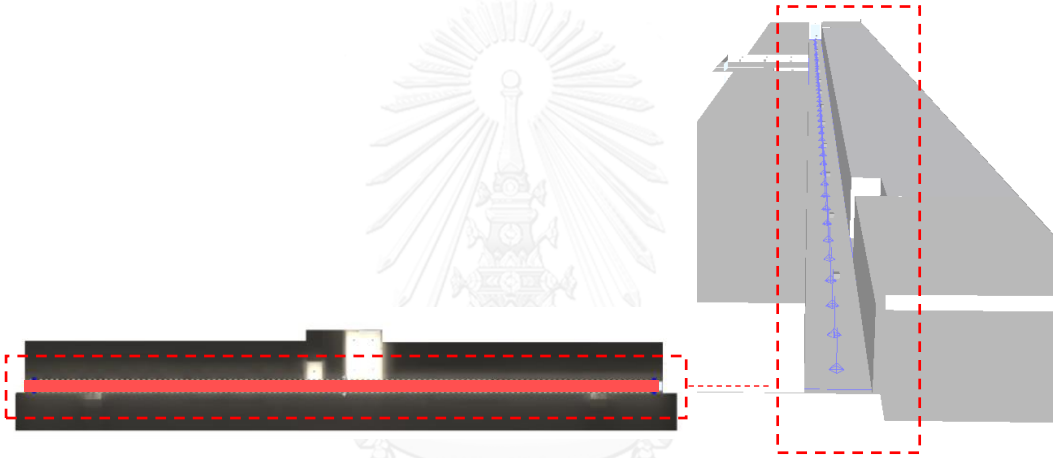
ภาพที่ 3. 6 แสดงรูปตัด Plum condominium



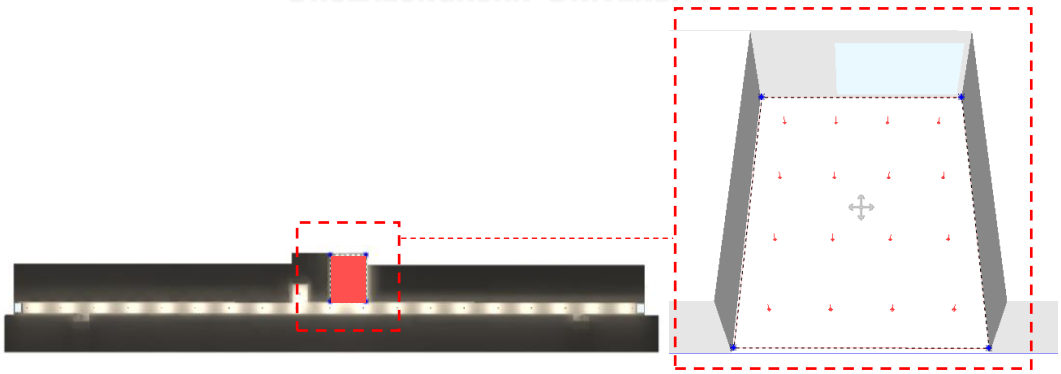
ภาพที่ 3. 7 การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม DIALux 4.12

3.4.3 การสร้างพื้นที่พิจารณาระดับความส่องสว่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ในการแบ่งพื้นที่เพื่อพิจารณาระดับความส่องสว่างในพื้นที่ทางเดินหน้าห้องพัก จะทำการวัดความสว่างพื้นที่ทำงานที่ระนาบพื้นทางเดิน (work plane) ที่ 0.00 เมตร โดยจะเลือกพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) บริเวณทางเดินยาวของพื้นที่ทางเดิน หรือพื้นที่พิจารณาระดับความส่องสว่างบริเวณพื้นที่ทางเดินยาว calculation grid 1 (ภาพที่ 3.8) 2) บริเวณโถงลิฟต์ หรือพื้นที่พิจารณาระดับความส่องสว่างบริเวณโถงลิฟต์ calculation grid 2 (ภาพที่ 3.9) เนื่องจากการเข้าสำรวจโครงการตัวอย่างทั้งสองพื้นที่มีระดับความส่องสว่างและรูปแบบการใช้งานที่ต่างกัน และเป็นการแบ่งพื้นที่บริเวณควบคุม (zoning) ที่เหมาะสมตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยงานวิจัยนี้เมื่อพิจารณาจากเกณฑ์แสงสว่างในหัวข้อ 3.1 จะระบุว่าพื้นที่ที่กำหนดจะต้องมีค่าความสว่างไม่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่ระบุไว้ หรือหมายถึงค่าการส่องสว่างต่ำสุด (E_{min}) จึงใช้ค่าดังกล่าวมาพิจารณาถึงความสว่างในงานวิจัย



ภาพที่ 3. 8 พื้นที่พิจารณาระดับความส่องสว่างบริเวณพื้นที่ทางเดินยาว (calculation grid 1)



ภาพที่ 3. 9 พื้นที่พิจารณาระดับความส่องสว่างบริเวณโถงลิฟต์ (calculation grid 2)

3.5 การกำหนดตัวแปรควบคุมของสถานการณ์แสงสว่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

การพิจารณาตัวแปรควบคุมที่ส่งผลต่อระดับแสงสว่างในการจำลองสถานการณ์หรือนำไปใช้อ้างอิงลักษณะแสงสว่างที่สามารถพบได้มากที่สุด ซึ่งได้สรุปไว้ในการทบทวนวรรณกรรม หัวข้อที่ 2.8 ของท้ายบทที่ 2 โดยจะเลือกศึกษาในช่วงวันที่ 21 ธันวาคม (winter Solstice) และวันที่ 21 มิถุนายน (summer solstice) ภายใต้สภาพท้องฟ้าแบบมีเมฆปกคลุมบางส่วน ช่วงเวลา 08.00 น. – 18.00 น.

3.6 การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุและปริมาณแสงจากหลอดไฟ

3.6.1 การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

การกำหนดขอบเขตค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุ จะวิเคราะห์จากพื้นผิวในโครงการตัวอย่างที่ได้ทำการศึกษา (ดูรายละเอียดวัสดุจากภาคผนวก 1) เปรียบเทียบกับ ตารางที่ 2.4 ที่แสดงสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิววัสดุที่มีสีต่างๆ เพื่อกำหนดช่วงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุพื้นผิวภายในที่จะทำการจำลองสภาพแสงสว่าง โดยพิจารณาร่วมกับภาพที่ 2.3 ที่แสดงช่วงการสะท้อนอ้างอิงตามค่า LRV ที่ได้กำหนดว่า สีขาวในอุดมคติที่มีค่าสะท้อนแสง 100% ไม่สามารถพบได้จริงในชีวิตประจำวัน และสีดำในอุดมคติที่มีค่าสะท้อนแสง 0% ไม่สามารถพบได้จริงในชีวิตประจำวันเช่นกัน

ตารางที่ 3. 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของของวัสดุภายในโครงการที่ได้ทำการศึกษา

โครงการ	วัสดุพื้น	วัสดุผนัง	วัสดุฝ้าเพดาน
The Tree, Interchange	กระเบื้องสีครีมอ่อน = 60%, กระเบื้องสีเทาเข้ม = 15%	ผนังทาสีขาว = 70%	ฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ดทาสีขาว = 70%
Plum condominium	กระเบื้องสีครีมอ่อนอ่อน 35%	ผนังทาสีเทา = 30%	ฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ดทาสีขาว = 70%
Urbano by Absolute	กระเบื้องสีเทาเข้ม = 15%	ผนังทาสีเทา = 30%, ผนังทาสีขาว = 70%	ฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ดทาสีขาว = 70%
Signature By Urbano	กระเบื้องสีครีมอ่อน = 35%, กระเบื้องสีน้ำตาลเข้ม = 15%	ผนังทาสีเทาอ่อน = 40%	ฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ดทาสีขาว = 70%
The Tree, Bang Po	กระเบื้องสีเทาเข้ม = 15%	ผนังทาสีขาว = 70%	ฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ดทาสีขาว = 70%

จากการสำรวจข้อมูลเบื้องต้น สามารถกำหนดอัตราค่าสะท้อนแสงของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัยได้ โดยในส่วนของฝ้าเพดานจะกำหนดไว้ที่ 70% เนื่องจากพื้นที่ทางเดินหน้าห้องพักโครงการที่ได้เข้าสำรวจทุกโครงการจะใช้ฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ดทาสีขาว ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงใกล้เคียงกับค่าดังกล่าวจึงกำหนดค่านี้เป็นตัวแปรควบคุมของการศึกษาวิจัย โดยจะเลือกกำหนดส่วนของพื้นและผนังให้มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงเท่ากันตั้งแต่ 20% – 70% ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าการสะท้อนแสงของวัสดุที่สามารถพบเห็นทั่วไปและมีการใช้งานจริงในพื้นที่ทางเดินหน้าห้องพัก ซึ่งจะได้จะได้อัตราค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3. 2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงภายในพื้นที่ที่ทำการศึกษา

ทางเลือก	ค่า R	Floor reflectance	Wall reflectance	Ceiling reflectance
1	20%	20%	20%	70%
2	30%	30%	30%	
3	40%	40%	40%	
4	50%	50%	50%	
5	60%	60%	60%	
6	70%	70%	70%	

3.6.2 การกำหนดปริมาณแสงจากหลอดไฟ

3.6.2.1 การศึกษาการใช้งานของดวงโคมและผังไฟฟ้าดั้งเดิม

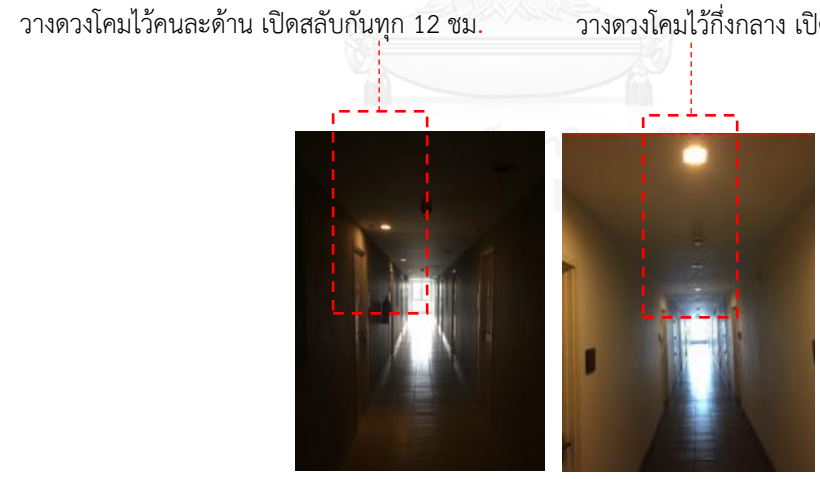
จากการเข้าสำรวจผังไฟฟ้าของโครงการ Plum condominium พบว่า มีการวางตำแหน่งของดวงโคมไว้ที่ตำแหน่งประตูและช่องประตูงานระบบด้านใดด้านหนึ่งของผนัง และอีกด้านวางตำแหน่งเยื้องกัน ทำให้ระยะห่างของดวงโคมแต่ละชิ้นไม่เท่ากันและไม่มีรูปแบบที่แน่นอนดังภาพที่ 3.11 ที่แสดงผังไฟฟ้าดั้งเดิมจากทางโครงการและแสดงส่วนขยายให้เห็นว่าการวางผังไฟฟ้าในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักโครงการนี้มีลักษณะไม่เป็นรูปแบบ ซึ่งยากต่อการนำมาเป็นกรณีฐานในการศึกษาวิจัยเรื่องการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมการหรี่ไฟ เนื่องจากระยะห่างแต่ละดวงโคมไม่เท่ากัน

ปัญหาแสงสว่างอีกประการพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก คือ เดิมพื้นที่ดังกล่าวหากมีการเปิดไฟเต็มประสิทธิภาพทุกดวงโคมจะมีค่าความส่องสว่างประมาณ 45 – 50 lux แต่ลักษณะการใช้งานจริง พื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักจะมีการเปิดไฟตลอด 24 ชม. ผังไฟฟ้าดั้งเดิมของโครงการเป็นลักษณะการใช้งานวงจรไฟฟ้าเดียว กล่าวคือ ไม่สามารถเปิดไฟสลับกันเพื่อให้ดวงโคมพักจากการใช้งานได้ การใช้งานแบบเปิดเต็มประสิทธิภาพทุกดวงโคมติดต่อกันทุกวันจะส่งผลต่ออายุการใช้งานของหลอดให้สั้นลง ทางโครงการจึงต้องทำการเปลี่ยนระบบวงจรใหม่ให้สามารถเปิดไฟสลับวงจรไฟฟ้าช่วงละ 12 ชม. จากการศึกษาโครงการ Plum condominium พบว่า ภายหลังจากการเปิดตัวโครงการให้ลูกบ้านเข้าพักอาศัยแล้ว ต้องทำการเดิน

วงจรไฟฟ้าใหม่เป็น 2 วงจรเองภายหลังเพื่อให้มีการใช้งานได้ตลอด 24 ชม. โดยแบ่งการใช้งานของวงจรตามแนวยาวของผนังคนละด้านดังภาพที่ 3.12 เพื่อให้เปิดไฟสลับกันได้ เมื่อทำการเปิดไฟสลับวงจรจะทำให้รูปแบบแสงประดิษฐ์ที่วางดวงโคมไว้ที่ตำแหน่งประตูที่ต้องการเน้นพื้นที่ดังกล่าวจะไม่เป็นตามแนวความคิดที่ผู้ออกแบบแสงสว่างต้องการ และจะส่งผลให้ผนังอีกด้านที่ไม่มีการเปิดใช้งานจะมืด ระยะห่างระหว่างดวงโคมจะเพิ่มขึ้นเท่าตัว จากเดิมประมาณ 2.1 – 3.0 เมตร เป็นประมาณ 4.7 – 5.1 เมตร ซึ่งระยะห่างของดวงโคมที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้พื้นที่ดังกล่าวมีความสว่างไม่เพียงพอตามเกณฑ์

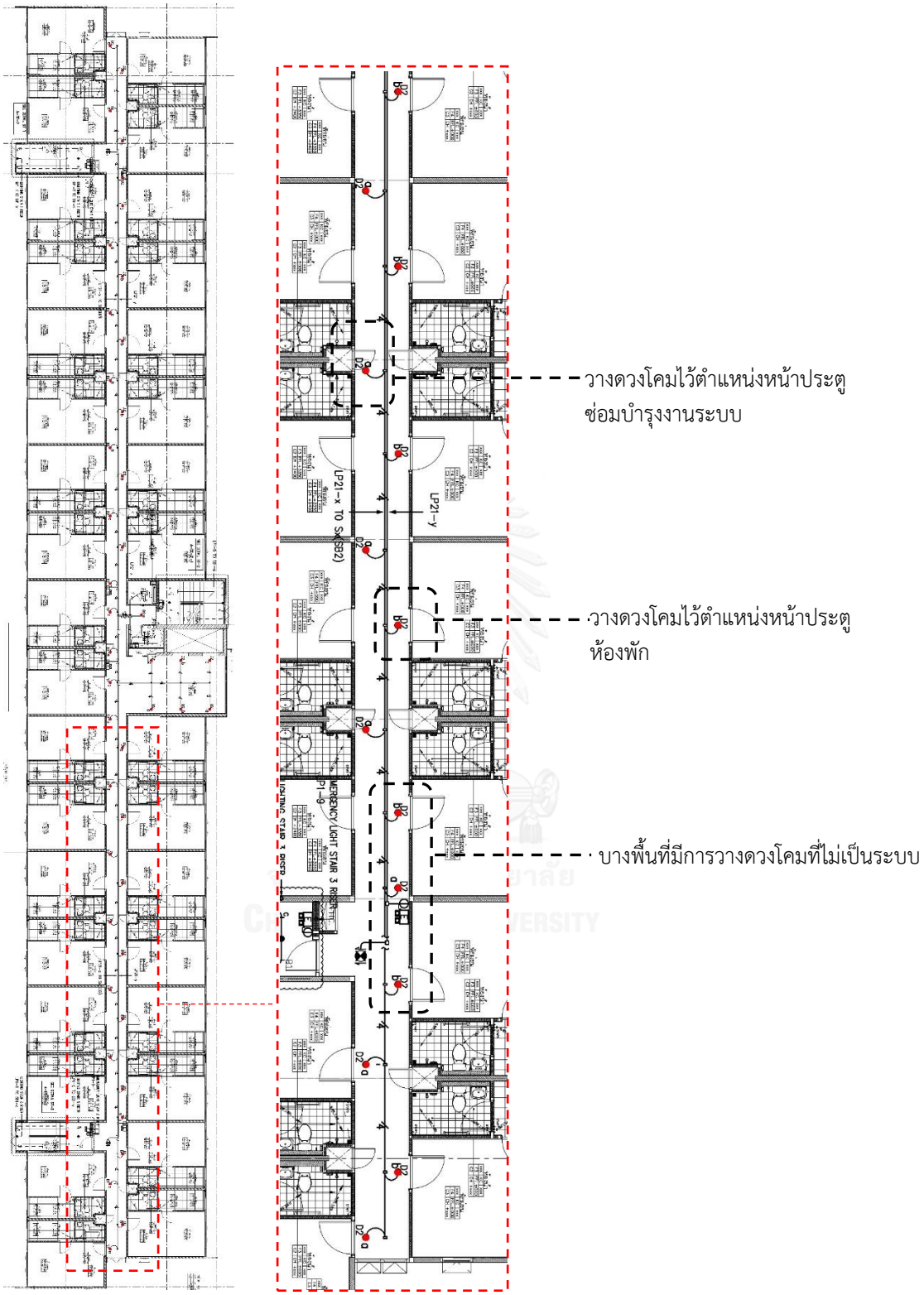
โดยจากการเข้าศึกษาโครงการ The Tree, Bang Po ที่มีลักษณะทางกายภาพคล้ายกับโครงการ Plum condominium พบว่า มีการเปิดไฟสลับวงจรไฟฟ้าเช่นกัน แต่มีการวางตำแหน่งของดวงโคมไว้ที่กึ่งกลางของพื้นที่ทางเดินทำให้มีการกระจายแสงที่ดีกว่า ทำการเปิดไฟเว้นดวงโคมทำให้ระยะห่างจากดวงโคมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีความสว่างไม่เพียงพอตามเกณฑ์เช่นกัน

จากการเข้าสำรวจโครงการเพื่อทราบถึงการใช้งานของดวงโคมและผังไฟฟ้าดั้งเดิม มีข้อเสนอแนะในการสำรวจโครงการ โดยผู้ออกแบบแสงสว่างพิจารณาออกแบบผังไฟฟ้าในโครงการใหม่ๆให้สลับการใช้งาน 2 วงจรไฟฟ้าได้ตลอด 24 ชม. ตั้งแต่ต้น และควรวางตำแหน่งของดวงโคมไว้ที่กึ่งกลางทางเดินเพื่อมีการกระจายแสงที่ดีกว่า สิ่งที่ควรจะพิจารณาเพิ่มเติมคือ โครงการที่มีการเปิดใช้งานแล้วและมีการแบ่งวงจรไฟฟ้าออกเป็น 2 วงจร และระยะห่างระหว่างดวงโคมเพิ่มมากขึ้น ควรใช้ดวงโคมที่มีหลอดไฟที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อให้พื้นที่ดังกล่าวมีระดับความส่องสว่างที่เพียงพอตามเกณฑ์



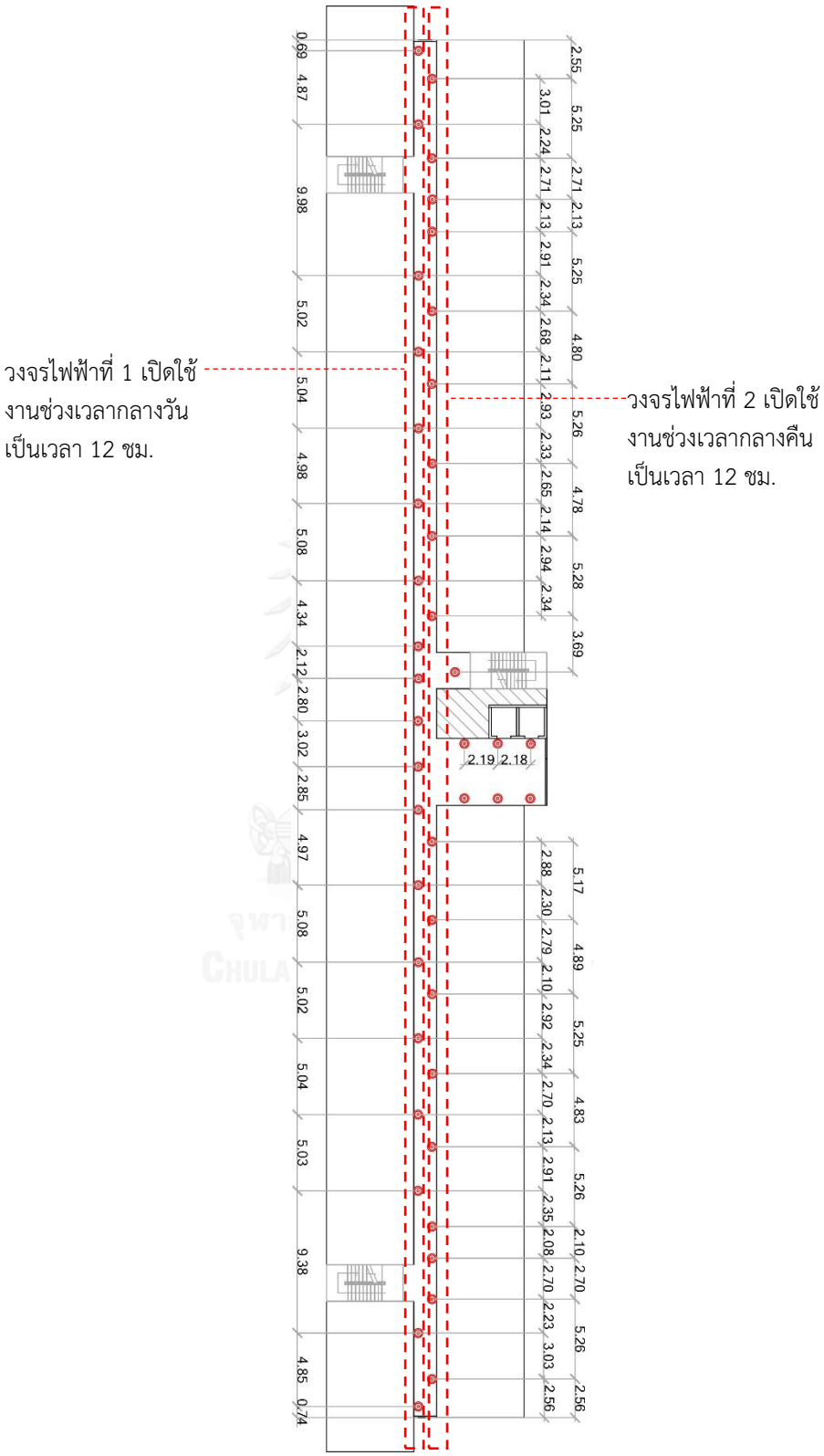
ภาพที่ 3. 10 ตำแหน่งของดวงโคมของและลักษณะการใช้งานภายในโครงการตัวอย่างที่ทำการศึกษา

โครงการ Plum condominium, Paholyothin 89 (ซ้าย) โครงการ The Tree, Bang Po (ขวา)



ภาพที่ 3. 11 แสดงผังไฟฟ้าดั้งเดิมของโครงการที่มีการวางตำแหน่งดวงโคมไว้ที่ประตูห้องพักและประตูซ่อมบำรุงงานระบบ

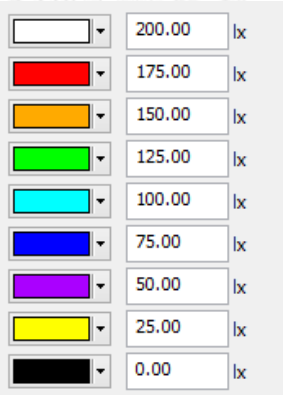
ที่มา : ข้อมูลจากทางโครงการ Plum condominium



ภาพที่ 3. 12 แสดงผังไฟฟ้าดั้งเดิม Plum condominium และการแบ่งการใช้งานของชุดวงจรไฟฟ้า

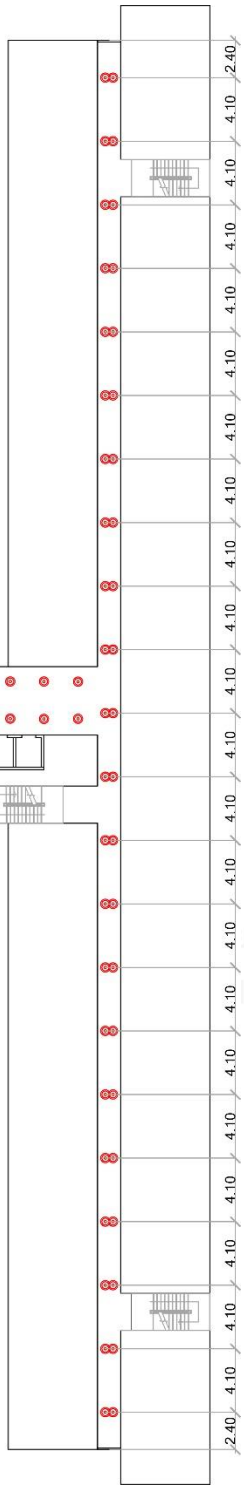
3.5.2.2 การปรับปรุงผังไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการนำมาเป็นกรณีฐานในงานวิจัย

ผังไฟฟ้าดั้งเดิมของโครงการ Plum condominium มีการวางตำแหน่งของดวงโคมไว้ที่ตำแหน่งประตูห้องพัก หากพิจารณาถึงการใช้งานจริงที่เปิดสลับวงจรไฟฟ้าจะทำให้ยากและมีการวางตำแหน่งของดวงโคมที่ไม่เป็นรูปแบบทำให้ยากต่อการศึกษาวิจัย ทางผู้วิจัยจึงปรับเปลี่ยนผังไฟฟ้าจากดั้งเดิมให้มาอยู่ตำแหน่งกึ่งกลางและมีระยะห่างเท่าๆกัน เพื่อให้ศึกษาวิจัยได้ง่ายขึ้น โดยที่ยังใช้จำนวนดวงโคมเท่าเดิมและศึกษานำร่องถึงการจำลองสถานการณ์แสงสว่างโดยใช้ดวงโคมที่เป็นหลอด compact fluorescent ขนาด 11w ปริมาณแสง 550 lumen ดั้งเดิมของโครงการ ค่าความสะท้อนของวัสดุกระเบื้องสีครีม = 0.35, ค่าความสะท้อนของผนังทาสีเทาอ่อน = 0.30 และค่าความสะท้อนของฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ดสีขาว = 0.70 การจำลองสถานการณ์เพื่อทดสอบสภาพความส่องสว่างจากดวงโคมนั้น ยังไม่พิจารณาถึงความสว่างจากแสงธรรมชาติ โดยสร้างแบบจำลองในโปรแกรม DIALux 4.12 เพื่อศึกษาถึงค่าเฉลี่ยความส่องสว่าง E_{av} และ ค่า false colors rendering ที่แสดงระดับความส่องสว่างโดยจะแสดงออกเป็นสีต่างๆ โดยกำหนดให้สีขาวมีค่าความสว่างสูงสุดที่ 200 lux และสีดำคือค่าความสว่างต่ำสุดที่ 0 lux หรือไม่มีความสว่าง ดังที่แสดงในภาพที่ 3.13

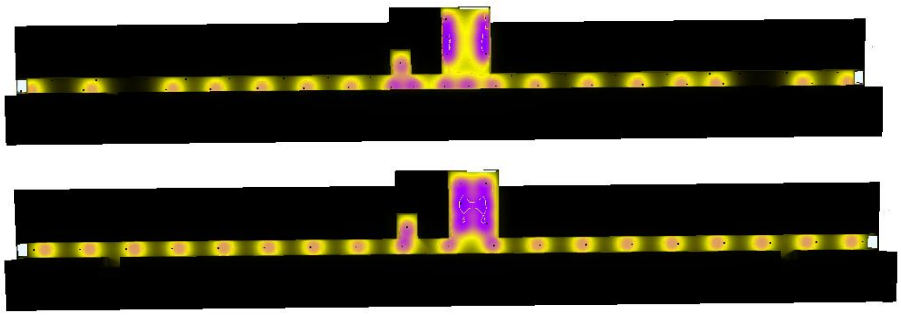


ภาพที่ 3. 13 ค่า false colors rendering ที่แสดงระดับความสว่างที่ใช้ในงานวิจัย

โดยการการจัดผังไฟฟ้าใหม่นั้นจะวางวางตำแหน่งดวงโคมไว้ที่กึ่งกลางของทางเดินในลักษณะ 2 โคมติดกันแต่แยกวงจร เพื่อรองรับการใช้งานเปิดไฟสลับกันได้ตลอด 24 ชม. กำหนดจำนวนของดวงโคมให้มีจำนวนเท่าเดิม คือ 44 ดวงโคม โดยจะได้ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างดวงโคมเป็นเป็นระยะห่างที่เท่าๆกันคือ 4.10 เมตร ซึ่งจะเหมาะสมกว่าในการนำมาศึกษาวิจัยเรื่องแสงสว่างดังภาพที่ 3.14 โดยที่จะทำการทดสอบการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของแสงประดิษฐ์เพื่อให้ทราบถึงความสว่างของพื้นที่เปรียบเทียบกับกรณีฐานก่อนที่จะมีการจัดวางผังดวงโคมใหม่ดังภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3. 14 แสดงผังไฟฟ้าที่ทำการปรับปรุงเพื่อใช้ในงานวิจัย Plum condominium



ภาพที่ 3. 15 การจำลองสถานการณ์แสงสว่างเพื่อศึกษาถึงรูปแบบแสงสว่างและค่าเฉลี่ยแสงสว่าง E_{av}
บน : สถานการณ์แสงสว่างจากผังไฟฟ้าดั้งเดิม ล่าง : สถานการณ์แสงสว่างจากผังไฟฟ้าดั้งเดิม

จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างเพื่อเปรียบเทียบถึงความสว่างจากผังไฟฟ้าดั้งเดิมและการจัดผังไฟฟ้าใหม่ พบว่า ผังไฟฟ้าดั้งเดิม ในพื้นที่คำนวณแสงสว่าง calculation grid 1 มีค่าความสว่างเฉลี่ย E_{av} เท่ากับ 18 lux และ ในพื้นที่คำนวณแสงสว่าง calculation grid 2 มีค่าความสว่างเฉลี่ย E_{av} เท่ากับ 36 lux ซึ่งในส่วนของ พื้นที่คำนวณแสงสว่าง calculation grid 1 มีค่าความสว่างใกล้เคียงกับที่วัดจริง โดยใช้ lux meter ณ สถานที่ Plum condominium มีค่า E_{av} เท่ากับ 19 lux ซึ่งถือว่าการจำลองสถานการณ์แสงสว่างด้วยโปรแกรม DIALux 4.12 คลาดเคลื่อนไม่เกิน 10% และสามารถนำมาใช้ได้ในการศึกษาวิจัยได้

จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างโดยการจัดผังไฟฟ้าใหม่ พบว่า ในพื้นที่คำนวณแสงสว่าง calculation grid 1 มีค่าความสว่างเฉลี่ย E_{av} เท่ากับ 22 lux และ ในพื้นที่คำนวณแสงสว่าง calculation grid 2 มีค่าความสว่างเฉลี่ย E_{av} เท่ากับ 42 lux ซึ่งมีค่าความสว่างมากกว่าการวางผังไฟฟ้าดั้งเดิมโดยไม่ต้องเพิ่มจำนวนดวงโคม ซึ่งถือได้ว่าการวางตำแหน่งดวงโคมไว้กึ่งกลางจะให้มีความสว่างมากขึ้นกว่าเดิม และเป็นรูปแบบที่สามารถทำการศึกษาเรื่องแสงสว่างได้ง่าย และเหมาะสมในการนำมาเป็นกรณีฐานในการศึกษาวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

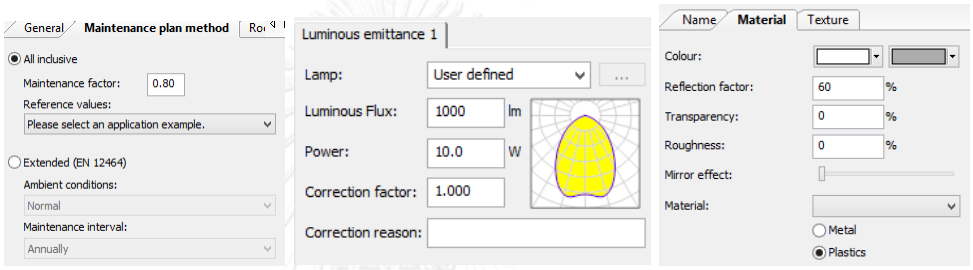
3.5.2.3 การกำหนดปริมาณแสงจากหลอดไฟ

การกำหนดปริมาณแสงจากหลอดในการศึกษาวิจัย จะเปลี่ยนจากหลอด compact fluorescent เดิมมาเป็นหลอด LED เนื่องจากหลอด LED สามารถนำไปใช้ร่วมกับอุปกรณ์ควบคุมการหรี่ไฟได้ กินไฟน้อยลงประหยัดพลังงานมากขึ้น และให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า โดยจะแบ่งช่วงปริมาณแสงของหลอดไฟ ตั้งแต่ 400 lumen โดยจะเพิ่มปริมาณแสงตามกำลังวัตต์ที่เพิ่มขึ้น ระดับละ 200 lumen เพื่อสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหลอดไฟตามท้องตลาดได้แต่ละช่วงของปริมาณแสงได้ โดยมีทางเลือกในการจำลองดังนี้

ทางเลือกที่ 1 - หลอด LED 4W ความสว่าง 400 lumen
ทางเลือกที่ 2 - หลอด LED 6W ความสว่าง 600 lumen
ทางเลือกที่ 3 - หลอด LED 8W ความสว่าง 800 lumen
ทางเลือกที่ 4 - หลอด LED 10W ความสว่าง 1,000 lumen
ทางเลือกที่ 5 - และหลอด LED 12W ความสว่าง 1,200 lumen
ทางเลือกที่ 6 - และหลอด LED 14W ความสว่าง 1,400 lumen

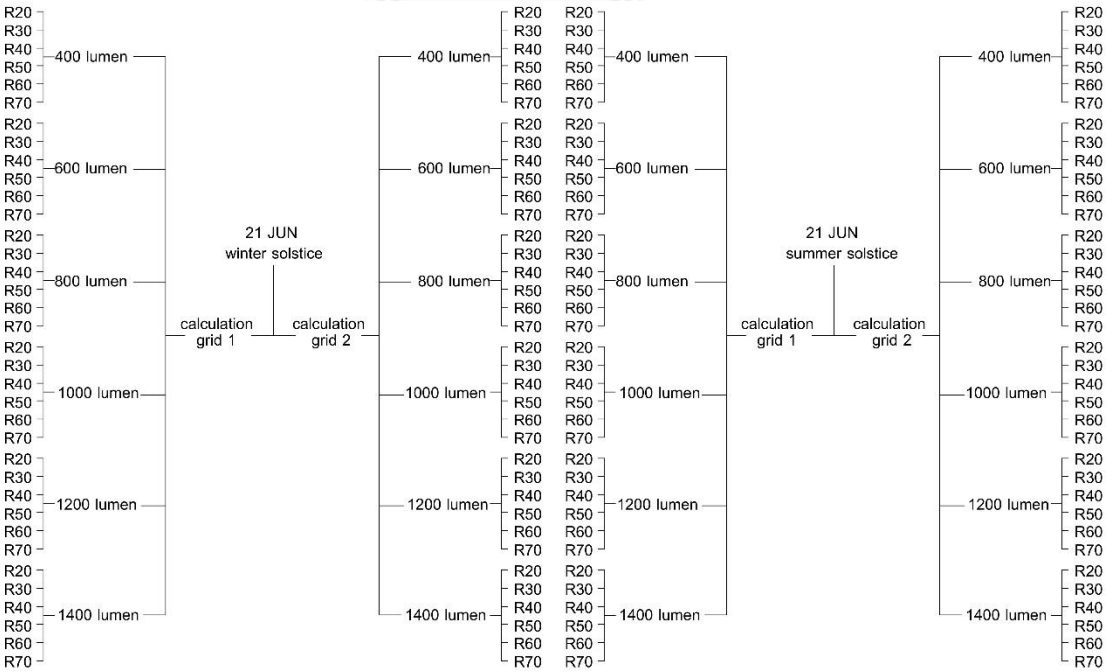
3.6 การจำลองสภาพแสงสว่าง

ผู้วิจัยจะทำการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก โครงการ Plum condominium ด้วยโปรแกรม DIALux 4.12 โดยเลือกจำลองในวันที่ 21 มิถุนายน และ 21 ธันวาคม เวลา 08.00-18.00 น. ตั้งค่าสภาพท้องฟ้าในการจำลองแบบมีเมฆปกคลุมบางส่วน maintenance factor = 0.80 เลือกจำลองในสถานการณ์ที่มีอัตราค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในตั้งแต่ 20 - 70 ดวงโคมที่ใช้ในการจำลองเป็นดวงโคมดาวไลท์ ยี่ห้อ Lamptitude รุ่น NE-BOX-1-WH ซึ่งใช้กับหลอด LED 9.5 W แต่ในการจำลองแสงสว่าง ผู้วิจัยได้ปรับปริมาณแสงสว่างให้มีค่าตั้งแต่ 400-1,400 lumen เพื่อนำค่าดังกล่าวมาพิจารณาทางเลือกในการออกแบบให้มีค่าความส่องสว่างตามเกณฑ์และทราบถึงความสัมพันธ์ของค่าสะท้อนแสงพื้นผิวภายในและปริมาณแสงจากหลอดไฟที่ส่งผลต่อความสว่างในพื้นที่ได้ โดยมีแผนการจำลองสถานการณ์แสงสว่างดังต่อภาพที่ 3.17

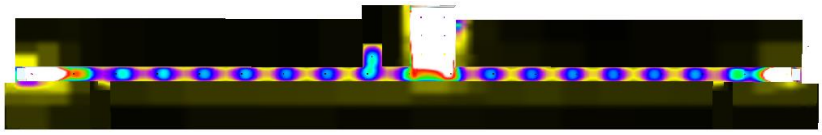


ภาพที่ 3. 16 การตั้งค่าตัวแปรต่างๆในโปรแกรม DIALux 4.12

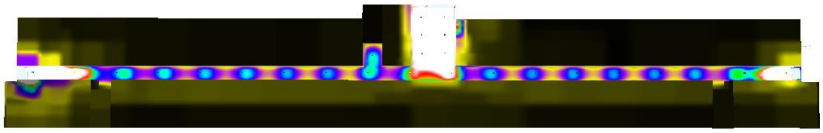
ซ้าย : การใส่ค่า maintenance factor กลาง : การใส่ค่าประสิทธิภาพของหลอดไฟ ขวา : การใส่ค่าสะท้อนแสงของพื้นผิว



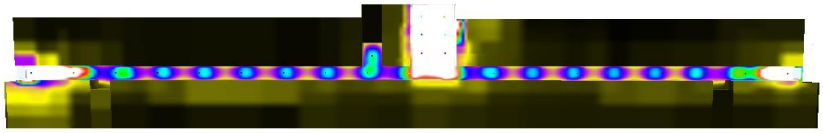
ภาพที่ 3. 17 แผนการจำลองแสงสว่างในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักที่มีอัตราค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในตั้งแต่ 0.20-0.70 และและใช้หลอดไฟ LED ที่มีปริมาณแสงสว่างตั้งแต่ 400-1200 lumen



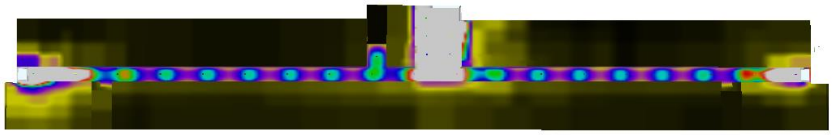
ภาพที่ 3. 18 แสดงการจำลองสถานการณ์แสงสว่างพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก โดยการใช้หลอดไฟที่มีค่าความสว่าง 1,000 lumen ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง 40%



ภาพที่ 3. 19 แสดงการจำลองสถานการณ์แสงสว่างพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก โดยการใช้หลอดไฟที่มีค่าความสว่าง 1,000 lumen ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง 60%



ภาพที่ 3. 20 แสดงการจำลองสถานการณ์แสงสว่างพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก โดยการใช้หลอดไฟที่มีค่าความสว่าง 1,000 lumen ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง 60%



ภาพที่ 3. 21 แสดงการจำลองสถานการณ์แสงสว่างพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก โดยการใช้หลอดไฟที่มีค่าความสว่าง 1,000 lumen ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง 70%

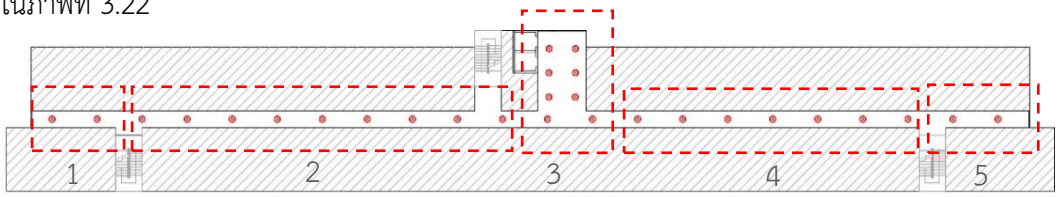
ภาพที่ 3.17 - 3.20 ตัวอย่างงการจำลองสถานการณ์แสงสว่างด้วยโปรแกรม DIALux 4.12
(จำลองสถานการณ์ในวันที่ 21 ธันวาคม เวลา 10.00 น.)

3.7 การพิจารณาการขอบเขตใช้งานอุปกรณ์ daylight sensor และ motion sensor

จากการทบทวนวรรณกรรมที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 (J. A. Gangali และ A. D. Shaligram, 2012) จะนำแนวทางดังกล่าวมาพิจารณาใช้งานกับงานวิจัยดังนี้ โดยการวางผังไฟฟ้าใหม่ของโครงการ จะวางในลักษณะ 2 ดวงโคมติดกันแต่แยกวงจร ในการศึกษาวิจัยเรื่องขอบเขตการใช้งานของอุปกรณ์ daylight sensor และ motion sensor จะเลือกพิจารณาเพียงดวงโคมเดียวเนื่องจากการรูปแบบการใช้งานเปิดสลับวงจรไฟฟ้า

3.7.1 การแบ่งพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักออกเป็นส่วนตามลักษณะแสงสว่าง เพื่อกำหนดขอบเขตการทำงานของ daylight sensor

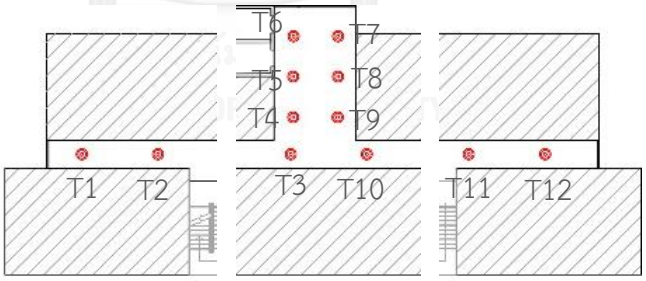
จากการศึกษาการจำลองสถานการณ์แสงสว่างเบื้องต้น สามารถแบ่งพื้นที่ออกเป็น 5 ส่วน คือ 1) บริเวณช่องเปิดรับแสงทางทิศตะวันตก 2) พื้นที่ส่วนลึกของทางสัญจรทางทิศตะวันตก 3) พื้นที่บริเวณโถงลิฟต์ 4) พื้นที่ส่วนลึกของทางสัญจรทางทิศตะวันออก 5) บริเวณช่องเปิดรับแสงทางทิศตะวันออก ดังที่แสดงในภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3. 22 การแบ่งพื้นที่ทาสัญจรห้องพักออกเป็นส่วนต่างๆ ในการนำมาศึกษาวิจัยเรื่องประสิทธิภาพการใช้อุปกรณ์

3.7.2 การกำหนดตำแหน่งการควบคุม (zoning) เพื่อจะสร้างชุดคำสั่งในการลดการใช้ดวงโคมในพื้นที่

พื้นที่ที่จะนำมากำหนดรูปแบบการลดจำนวนใช้ดวงโคมจากอุปกรณ์ daylight sensor คือพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลจากแสงธรรมชาติ พื้นที่ที่ 1, 3, 5 ดังภาพที่ 3.22 โดยจะกำหนดสัญลักษณ์ดวงโคมเพื่อจะนำไปสร้างชุดคำสั่งในการลดการใช้ดวงโคมในพื้นที่ได้มีระดับแสงธรรมชาติเพียงพอ

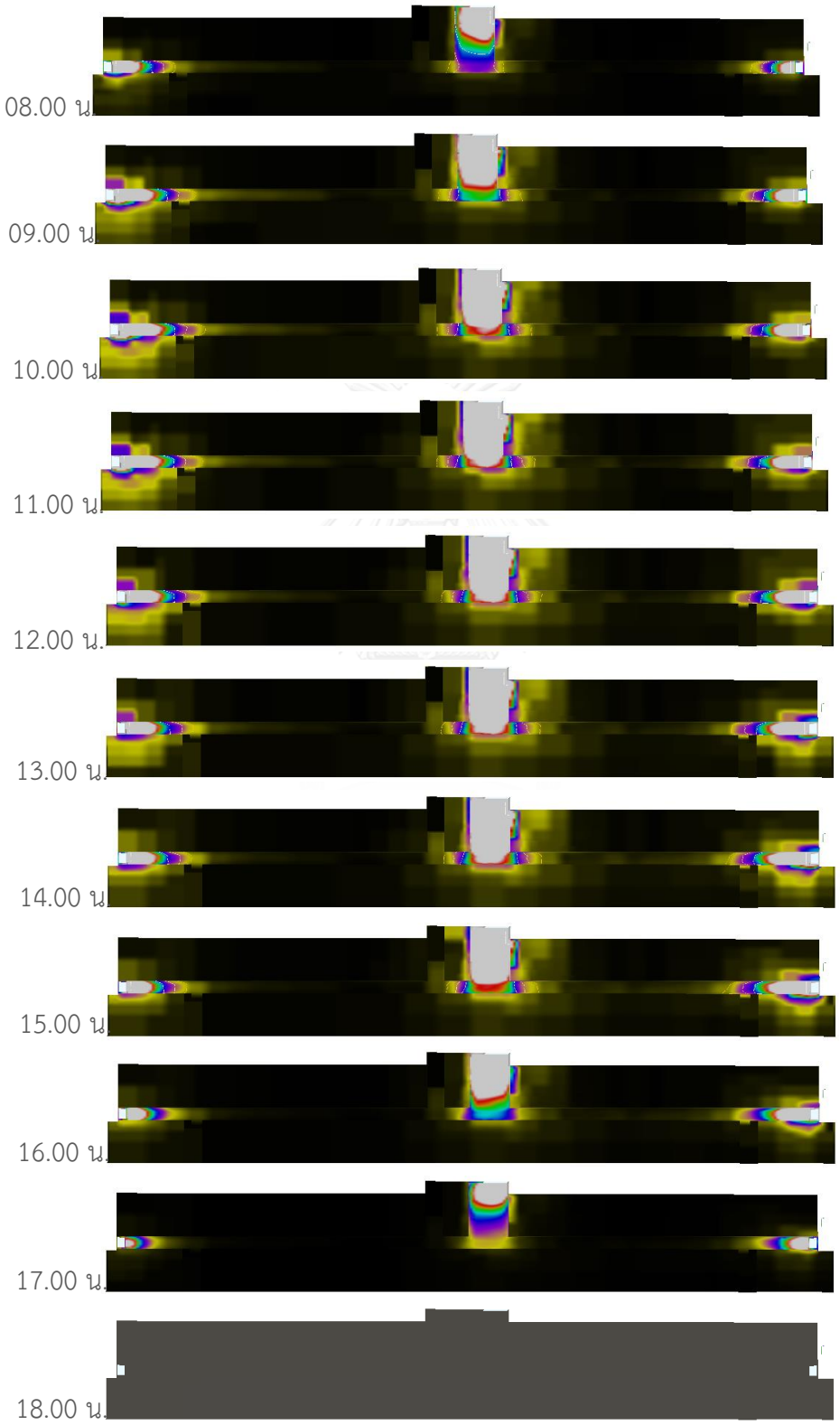


ภาพที่ 3. 23 การกำหนดสัญลักษณ์ดวงโคมเพื่อพิจารณาหารูปแบบชุดคำสั่งการลดการใช้ดวงโคม

3.7.3 การพิจารณาความต้องการใช้ดวงโคมในแต่ละช่วงเวลาเพื่อพิจารณาหารูปแบบในการลดการใช้ดวงโคมหรือหรี่ไฟในตำแหน่งต่างๆ

จากการศึกษางานวิจัยของ (Gangali et al., 2012) ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 การพิจารณาความต้องการใช้ดวงโคมในแต่ละช่วงเวลาของงานวิจัยจะอาศัยจากการสังเกตในพื้นที่จริง จะนำแนวทางมาประยุกต์กับงานวิจัยชิ้นนี้โดยจะใช้วิธีสังเกตจากการจำลองสถานการณ์แสงสว่าง พิจารณาเฉพาะแสงธรรมชาติในแต่ละ

ช่วงเวลาเพื่อหาทางเลือกชุดคำสั่งในการลดการใช้ดวงโคม โดยจะเลือกจำลองสถานการณ์ในวันที่ 21 ธันวาคม ภายในห้องที่มีอัตราค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิว 0.70



ภาพที่ 3. 24 การจำลองสถานการณ์แสงธรรมชาติเพื่อศึกษาถึงตำแหน่งการลดการใช้ดวงโคม

3.7.4 การพิจารณาพิจารณารูปแบบในการลดการใช้ดวงโคมหรือหรี่ไฟในตำแหน่งต่างๆ

จากการศึกษาถึงการจำลองสถานการณ์แสงธรรมชาติ สามารถแบ่งช่วงเวลาได้ 3 ช่วงได้ดังนี้

1) ช่วงเวลาที่มีระดับแสงธรรมชาติในระดับสูง คือเวลา 11.00 น. -14.00 น. จะใช้รูปแบบ A
2) ช่วงเวลาที่มีระดับแสงธรรมชาติในระดับปานกลาง คือเวลา 09.00 น. – 10.00 น. และ 15.00 – 16.00 น. จะใช้รูปแบบ B
3) ช่วงเวลาทีมีระดับแสงธรรมชาติในระดับค่อนข้างต่ำ คือเวลา 08.00 น. - 9.00 น. และ 17.00 – 18.00 น. จะใช้รูปแบบ C
4) ช่วงเวลาทีมีระดับแสงธรรมชาติในระดับต่ำ คือเวลา 08.00 น. และ 18.00 น. จะใช้รูปแบบ D

โดยจะแสดงรายละเอียดการลดการใช้ดวงโคมเพื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพความสว่างได้ดังตารางที่ 3.3 (อ้างอิงตำแหน่งดวงโคมตามภาพที่ 3.23)

ตารางที่ 3. 3 แสดงรูปแบบการลดการใช้ดวงโคมในการพิจารณาการทำงานของอุปกรณ์ daylight sensor

รูปแบบ	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
A	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
B	■	■		■	■	■	■	■	■		■	■
C	■	■			■	■	■	■			■	■
D	■				■	■	■	■				■

ข้อมูลชุดคำสั่งดังกล่าว จะนำไปตั้งค่า lighting control group ในโปรแกรม DIALux 4.12 เพื่อนำไปทดสอบสถานการณ์แสงสว่างทั้ง 2 วันสำคัญ โดยเมื่อนำไปทดสอบแล้ว จะวิเคราะห์ถึงค่าความสว่างภายในพื้นที่ให้เพียงพอต่อเกณฑ์แสงสว่างที่ 50 lux

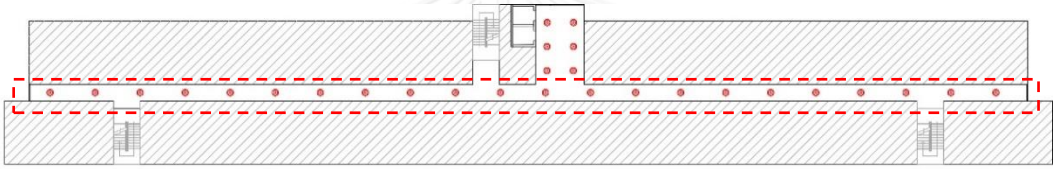
3.7.6 การแบ่งพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักออกเป็นส่วนตามพฤติกรรมผู้ใช้อาคาร เพื่อกำหนดของเขตการทำงานของ motion sensor

1) ช่วงเวลากลางวัน 10.00 น. – 16.00 น. ของวันจันทร์ – วันศุกร์ เป็นช่วงเวลาที่จะมีผู้ใช้งานอย่างเบาบาง เนื่องจากเป็นเวลาที่ผู้พักอาศัยออกไปทำงาน โดยกำหนดการใช้งานของอุปกรณ์ motion sensor หรี่ไฟให้จากเดิมเกณฑ์ 50 lux มาเป็น 20 lux ตามเกณฑ์พื้นที่ทางสัญจรเบาบาง โดยพื้นที่ที่จะอยู่ในขอบเขตการทำงานของอุปกรณ์คือพื้นที่ส่วนลึกของทางเดินตามภาพที่ 3.25 โดยจะไม่พิจารณาร่วมกับพื้นที่ที่อยู่ในขอบเขตการทำงานของ daylight sensor เนื่องจากจะมีการปิดดวงโคมเมื่อได้รับอิทธิพลแสงธรรมชาติในช่วงเวลากลางวัน โดยการทำงานของ motion sensor จะกำหนดทางเลือกในการหรี่ไฟ

(dimming value) ในโปรแกรม DIALux 4.12 ที่มีค่าระหว่าง 50% - 80% เพื่อทดสอบค่าความสว่างให้เพียงพอต่อเกณฑ์พื้นที่สัญจรเบาบาง 20 lux

ภาพที่ 3. 25 ขอบเขตการทำงานของ motion sensorช่วงเวลากลางวัน

2) ช่วงเวลากลางคืน 23.00 น. – 06.00 น. ของทุกวันเป็นช่วงเวลากลางคืนที่จะมีผู้ใช้งานอย่างเบาบาง โดยกำหนดขอบเขตการทำงานของอุปกรณ์อยู่เฉพาะในพื้นที่ทางเดินตามยาว (ภาพที่ 3.26) เนื่องจากบริเวณโถงลิฟต์ยังต้องการความสว่างตามเกณฑ์ที่ต้องให้ความรู้สึกปลอดภัยและการปรับตัวด้านแสงสว่างในช่วงเวลาเปิดลิฟต์โดยสาร



ภาพที่ 3. 26 ขอบเขตการทำงานของ motion sensorช่วงเวลากลางคืน

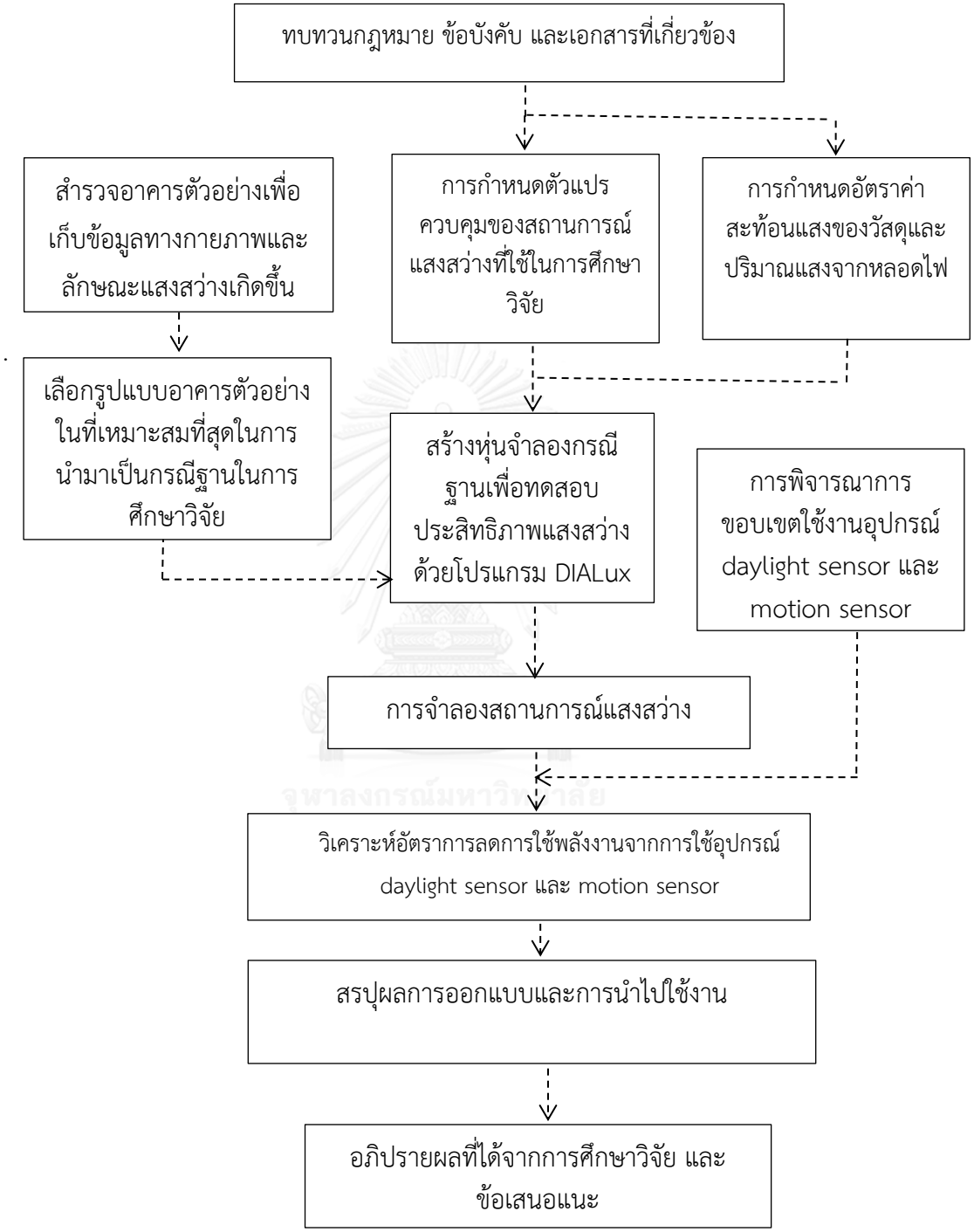
3.8 วิเคราะห์อัตราการลดการใช้พลังงานจากการใช้อุปกรณ์ daylight sensor และ motion sensor

โดยการนำผลการทดลองที่ได้จากการจำลองสภาพแสงสว่าง มาเปรียบเทียบให้ผ่านเกณฑ์ แล้วคำนวณหาอัตราการลดการใช้พลังงาน โดยสำหรับ daylight sensor จะพิจารณาถึงการลดการใช้ดวงโคมรายชั่วโมง ส่วน motion sensor จะพิจารณาถึงค่าไฟฟ้าที่ลดลงจากการหรี่ไฟ โดยจะใช้สมการการคำนวณค่าไฟฟ้าอย่างง่ายของการไฟฟ้านครหลวงที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2

3.9 สรุปผลการออกแบบและการนำไปใช้งาน

สรุปความสัมพันธ์ของค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในกับปริมาณแสงหลอดไฟที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพความสว่างในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก โดยสามารถนำแนวทางไปปรับปรุงอาคารที่มีอยู่ในปัจจุบันได้ หรือนำไปเป็นแนวทางในการกำหนดอัตราค่าสะท้อนแสงของวัสดุพื้นผิวภาพในและการเลือกใช้หลอดไฟที่มีประสิทธิภาพให้เพียงพอต่อความสว่างตามเกณฑ์พื้นฐานได้ และอีกทั้งทราบถึงประสิทธิภาพการใช้งานของอุปกรณ์ควบคุมการหรี่ไฟอัตโนมัติ daylight sensor และ motion sensor ในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก

3.10 อภิปรายที่ได้จากการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ



แผนภูมิที่ 3.1 ขั้นตอนการวิจัย

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุกับปริมาณแสงของดวงโคมที่มีผลต่อความสว่างในพื้นที่ทางเดินหน้าห้องพัก โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ต่อไปนี้

ส่วนที่ 1 ศึกษาค่าความสว่างที่ได้จากแสงธรรมชาติ ตั้งแต่เวลา 08.00-18.00 น. ที่ระนาบทำงานระดับพื้นของพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก โดยจะจำลองสภาพความสว่างด้วยโปรแกรม DIALux 4.12 พื้นผิวภายในของแบบจำลองส่วนพื้นและผนังจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงตั้งแต่ 20% - 70% และปริมาณแสงจากดวงโคมจะมีเปลี่ยนแปลงค่าความส่องสว่างตั้งแต่ 400 – 1,400 lumen

ส่วนที่ 2 ศึกษาอัตราค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวและเลือกใช้ดวงโคมที่มีปริมาณแสงเพียงพอต่อการใช้งาน

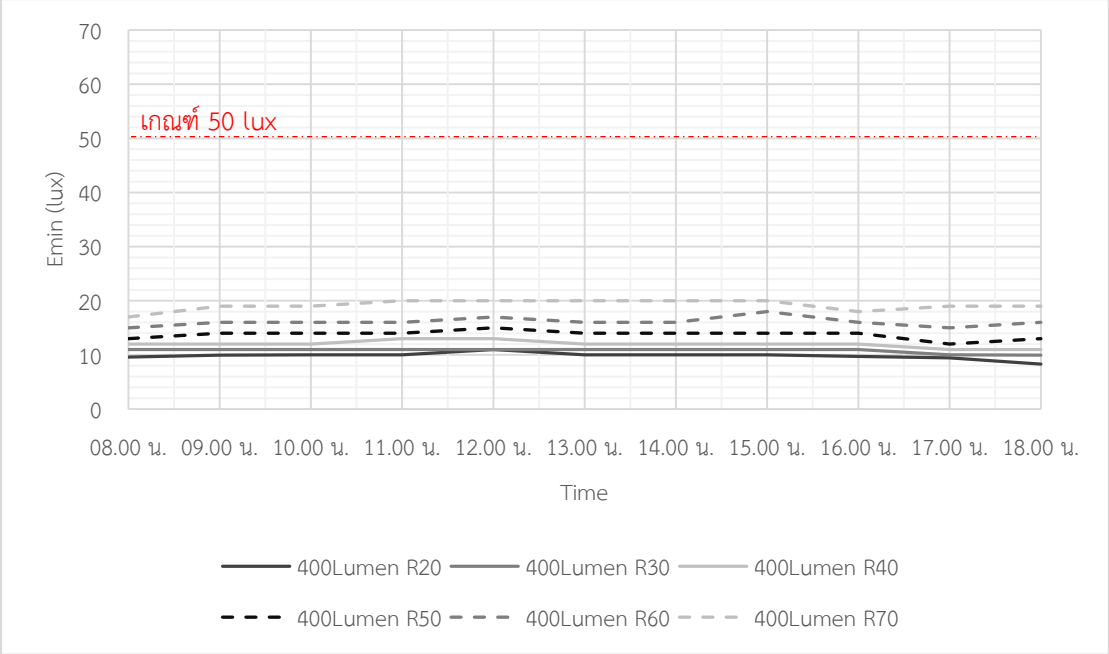
ส่วนที่ 3 ศึกษาการลดการใช้พลังงานจากอุปกรณ์ daylight sensor และ motion sensor

4.1 ศึกษาความสว่างจากระดับพื้นทำงานด้วยการจำลองสภาพการการให้แสงสว่างเสมือนจริงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ DIALux 4.12

ผู้วิจัยจะทำการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก Plum condominium ด้วยโปรแกรม DIALux 4.12 จะจำลองขนาดของพื้นที่ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วเบื้อง คือ (W x L x H) = 1.50 x 92.00 x 2.20 เมตร โดยจะวางอาคารตามสภาพแวดล้อมจริง คือช่องเปิดบริเวณโถงลิฟต์จะอยู่ทางทิศเหนือ สร้างรูปแบบที่มีผนังและพื้นมีอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างกัน ตั้งแต่ 0.20 - 0.70 และการเลือกใช้หลอดไฟที่มีประสิทธิภาพต่างๆกันที่มีปริมาณแสงตั้งแต่ 400 – 1400 lumen ในการคำนวณค่าความสว่างจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ พื้นที่การคำนวณแสงสว่าง calculation grid 1 และ พื้นที่การคำนวณแสงสว่าง calculation grid 2 ภายใต้สภาพท้องฟ้าแบบ partly cloudy ของวันสำคัญทั้งสองวันคือ วันที่ 21 ธันวาคม (winter solstice) และวันที่ 21 มิถุนายน (summer solstice) โดยจะศึกษาจากค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เนื่องจากผู้วิจัยต้องการให้ทุกตำแหน่งที่ใช้คำนวณแสงสว่างในพื้นที่ที่ทำการศึกษา

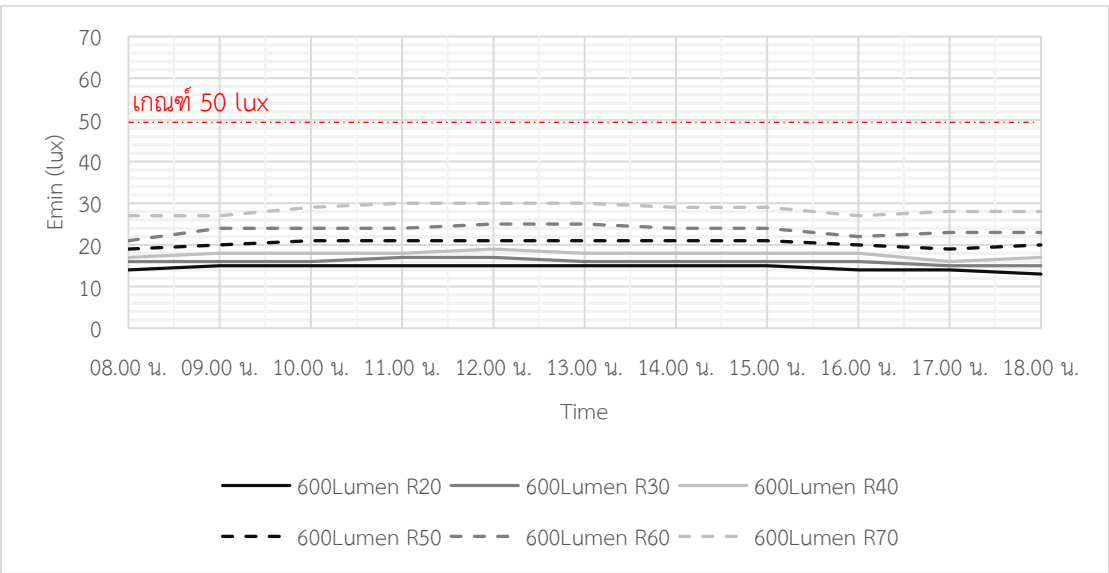
มีค่าความสว่างไม่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ส่วนค่า R คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุ และเส้นประสีแดงคือเส้นแสดงเกณฑ์แสงสว่างพื้นที่ทางสัญจรในอาคารที่ 50 lux

4.1.1 แสดงจากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม ในพื้นที่คำนวณแสงสว่าง calculation grid 1

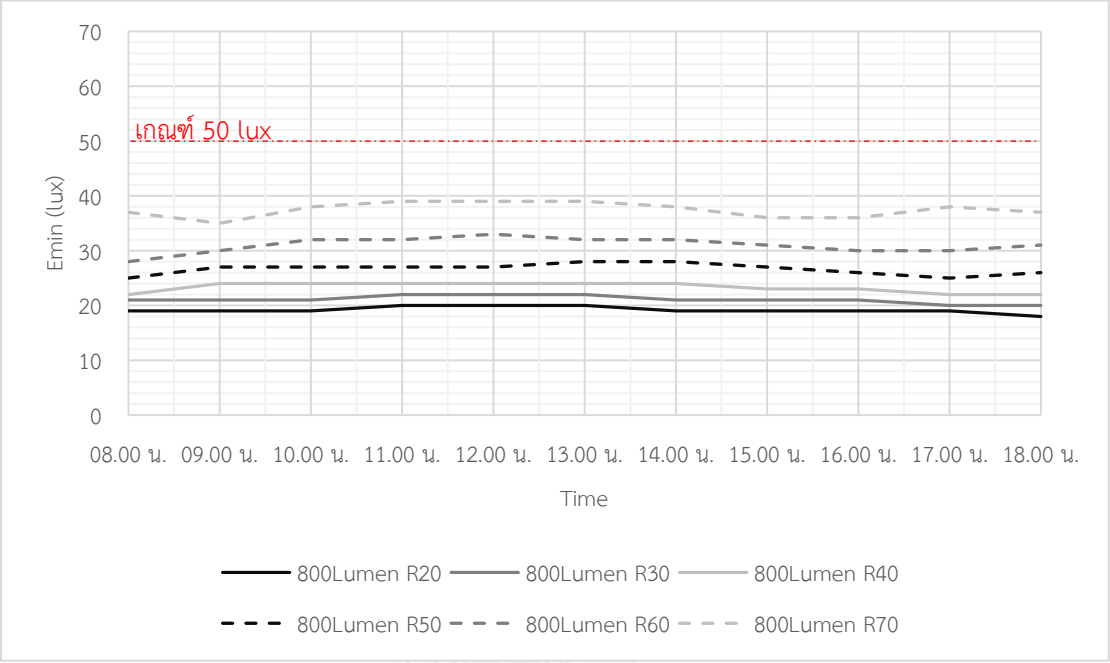


แผนภูมิที่ 4. 1 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 400 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน

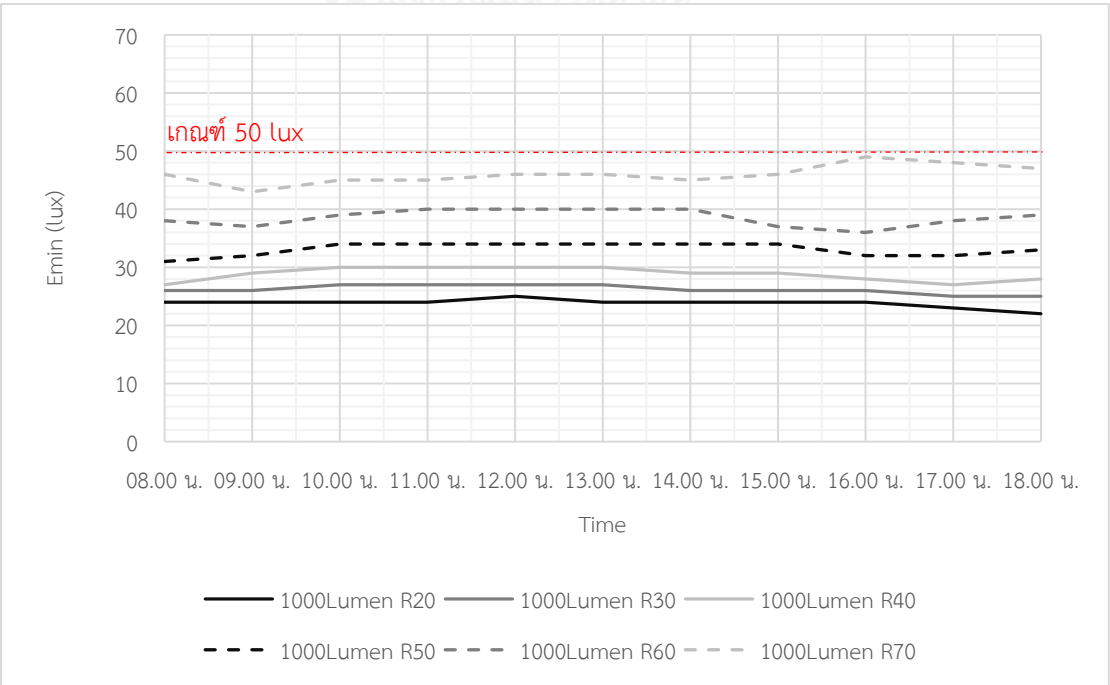
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



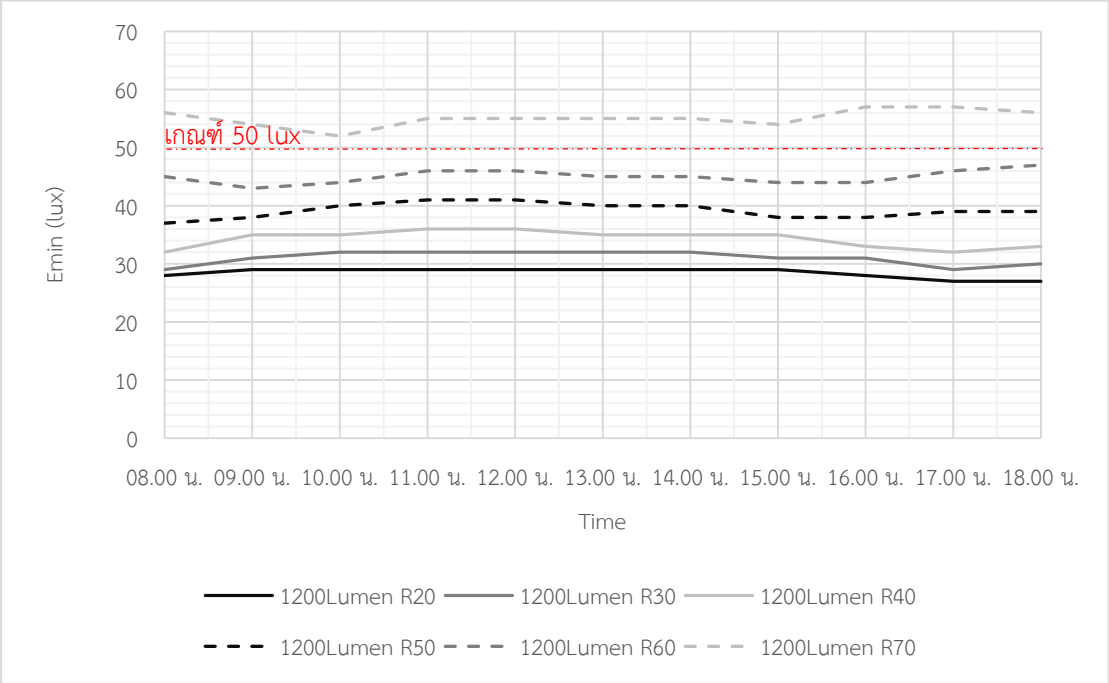
แผนภูมิที่ 4. 2 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 600 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน



แผนภูมิที่ 4. 3 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 800 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน

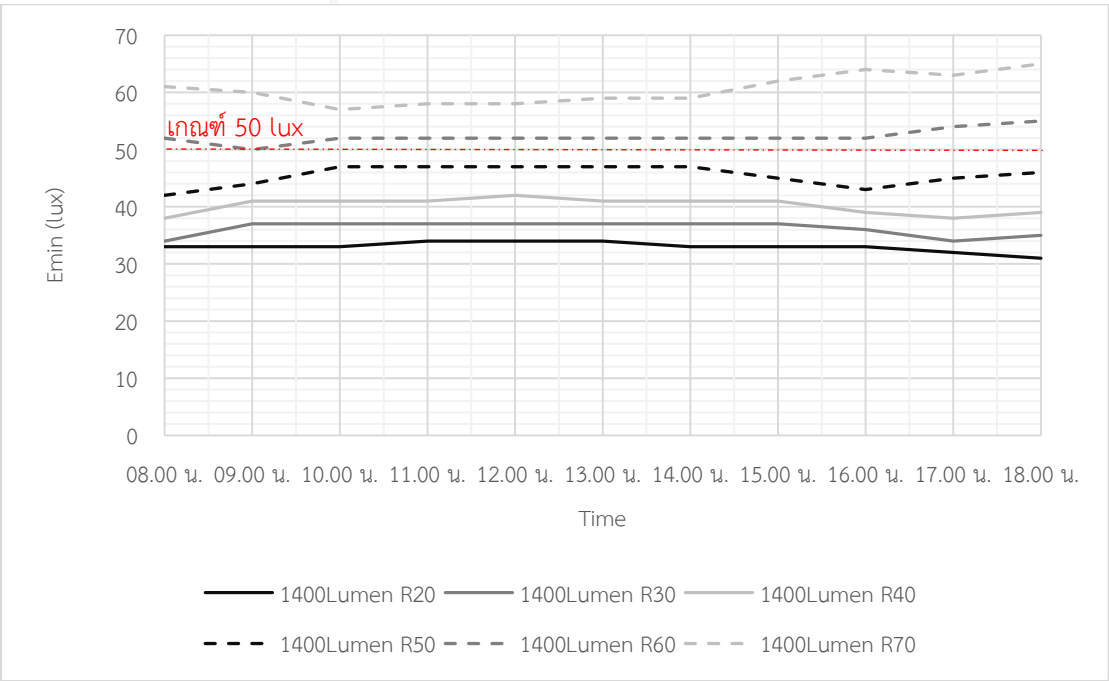


แผนภูมิที่ 4. 4 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,000 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน



แผนภูมิที่ 4. 5 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,200 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



แผนภูมิที่ 4. 6 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,400 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน

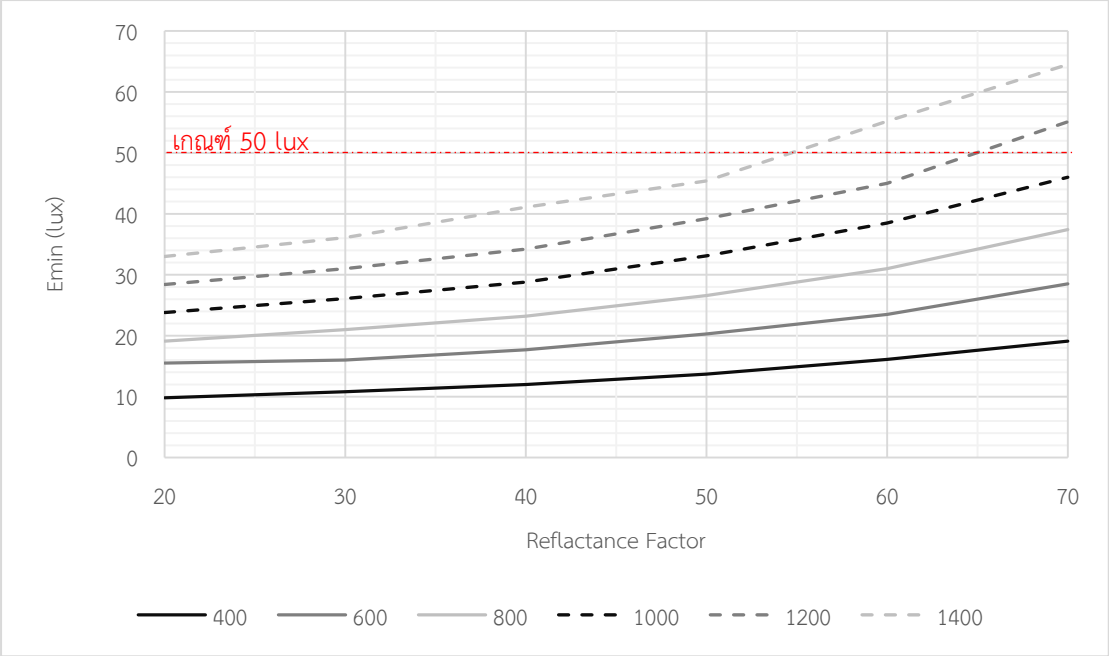
ค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม ในพื้นที่คำนวณแสงสว่าง calculation grid 1 ที่อยู่ในตำแหน่งทางสัญจรยาวที่มีช่องเปิดหน้าต่างบริเวณสุดปลายทางเดินทั้งสองด้าน พบว่า ความสว่างมีค่าค่อนข้างจะสม่ำเสมอตลอดทั้งวัน ปริมาณแสงจากหลอดไฟที่เลือกใช้จะมีผลต่อความสว่างของพื้นที่ โดยหากต้องการให้พื้นที่ดังกล่าวมีค่าความสว่างตามเกณฑ์พื้นที่ทางสัญจร 50 lux ต้องเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,200 lumen ในพื้นที่ที่มีอัตราค่าสะท้อนของพื้นผิว 0.70 ขึ้นไป จะมีค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ย 55.1 lux หรือ เลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,400 lumen ในพื้นที่ที่มีอัตราค่าสะท้อนของพื้นผิว 0.60 และ 0.70 จะมีค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ย 55.2 และ 64.5 lux ตามลำดับ โดยหลอดไฟที่มีปริมาณแสง 400 lumen จะให้ค่าความสว่างไม่เพียงพอต่อการใช้ในทุกกรณี โดยการเลือกอัตราค่าสะท้อนของพื้นผิวและความสว่างของหลอดไฟที่เหมาะสมกับพื้นที่ จะแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 โดยสีขาวคือรูปแบบที่มีความสว่างเพียงพอต่อเกณฑ์พื้นที่ทางสัญจรทั่วไปที่ 50 lux ซึ่งเป็นรูปแบบที่ดีที่สุด สีเทาอ่อนคือรูปแบบทีมีความสว่างเพียงพอต่อเกณฑ์พื้นที่ทางสัญจรเบาบางที่ 20 lux ขึ้นไป ซึ่งถือว่ายังพอยอมรับได้ ส่วนสีเทาเข้ม คือรูปแบบที่มีความสว่างไม่เพียงพอต่อเกณฑ์

ตารางที่ 4. 1 แสดงค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เมื่อมีการใช้อัตราค่าสะท้อนของพื้นผิวและปริมาณความสว่างของหลอดไฟต่างๆกัน จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างในวันที่ 21 ธันวาคม

ปริมาณแสง	R 20%	R 30%	R 40%	R 50%	R 60%	R 70%
400 lumen	9.8	10.8	12	13.7	16.1	19.1
600 lumen	15.5	16	17.7	20.3	23.5	28.5
800 lumen	19.1	21	23.2	26.6	31	37.4
1000 lumen	23.8	26.1	28.8	33.1	38.5	46
1200 lumen	28.4	31	34.2	39.2	45	55.1
1400 lumen	33	36.1	41.1	45.4	55.2	64.5

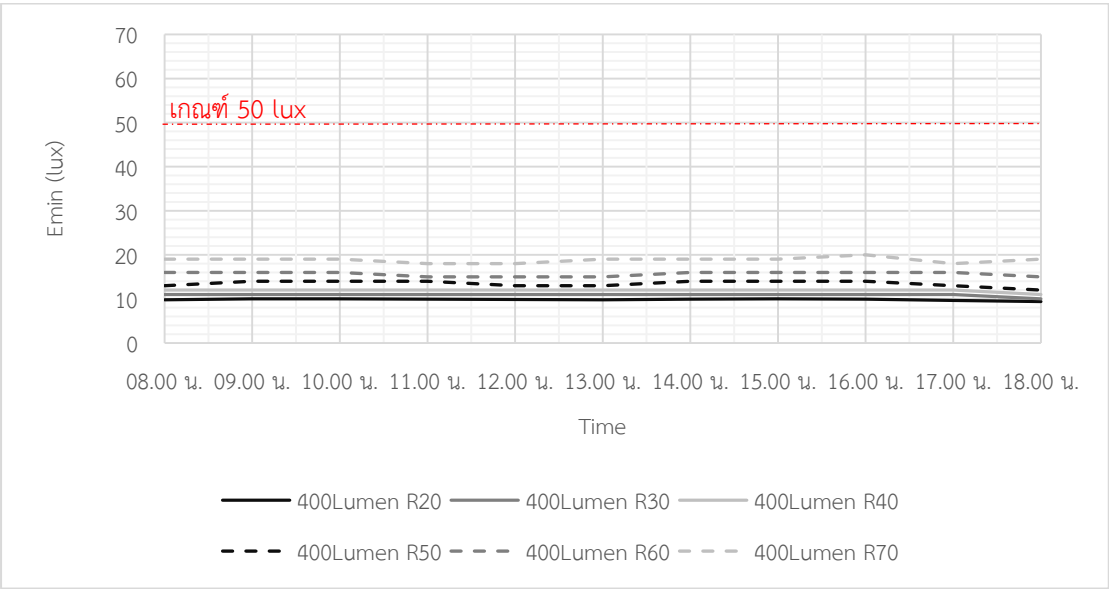
อัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในจะส่งผลเสริมกับการเลือกใช้หลอดไฟที่มีประสิทธิภาพ ห้องที่มีอัตราค่าสะท้อนของพื้นผิวภายในห้องมากและมีการเลือกใช้ดวงโคมที่มีประสิทธิภาพสูง จะยิ่งมีค่าความสว่างสูงมากขึ้นเทียบกับอัตราค่าสะท้อนแสงของห้องทั่วไป โดยที่อัตราค่าสะท้อนแสงที่อยู่ในช่วง 0.20-0.30 จะไม่ส่งผลมากนัก แต่เมื่อมีค่าตั้งแต่ 0.40 ขึ้นไปจะแสดงประสิทธิภาพได้เพิ่มมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น เมื่อเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณความสว่าง 1,400 lumen เมื่อมีอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในที่ 0.20 จะมีค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ย 33 lux แต่หากเพิ่มเป็น 0.70 ได้มีความสว่างเพิ่มขึ้นเป็น 64.5 lux เพิ่มขึ้นเป็นจำนวน 31.5 lux โดยจะสังเกตประสิทธิภาพได้จากแผนภูมิที่ 4.7 ที่แสดงความสัมพันธ์

ระหว่างอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในและปริมาณความสว่างจากหลอดไฟที่มีผลต่อความสว่างในพื้นที่ ของวันที่ 21 ธันวาคม พื้นที่การคำนวณแสงสว่าง calculation grid 1

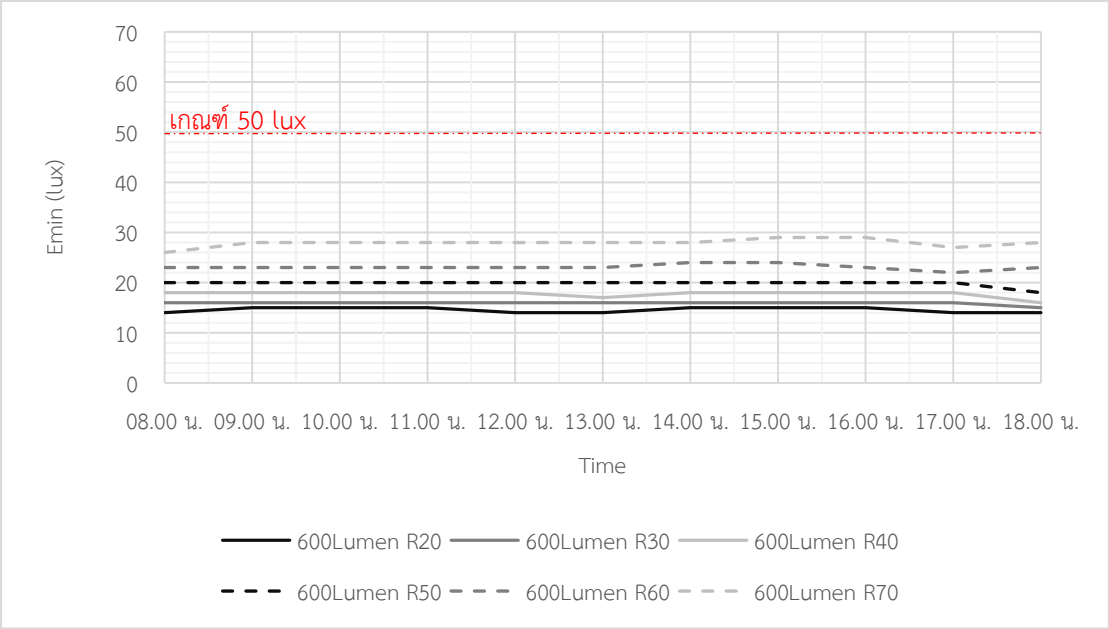


แผนภูมิที่ 4. 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวกับความสว่างต่ำสุด (E_{min}) จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม ในพื้นที่คำนวณแสงสว่าง calculation grid 1

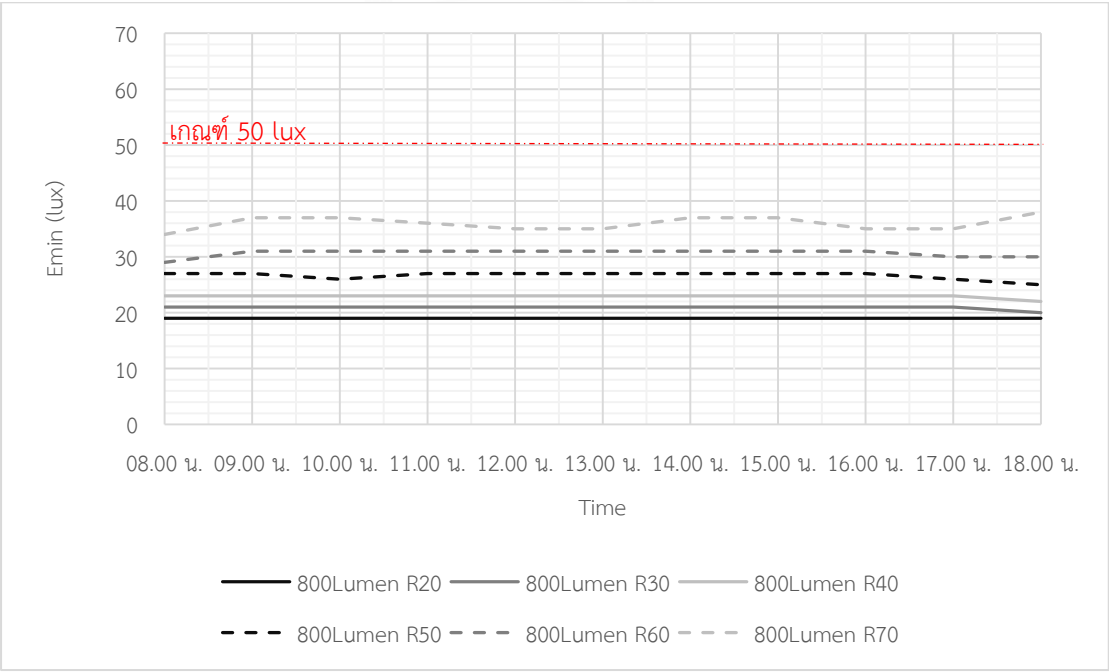
4.1.2 แสดงจากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน ในพื้นที่คำนวณแสงสว่าง calculation grid 1



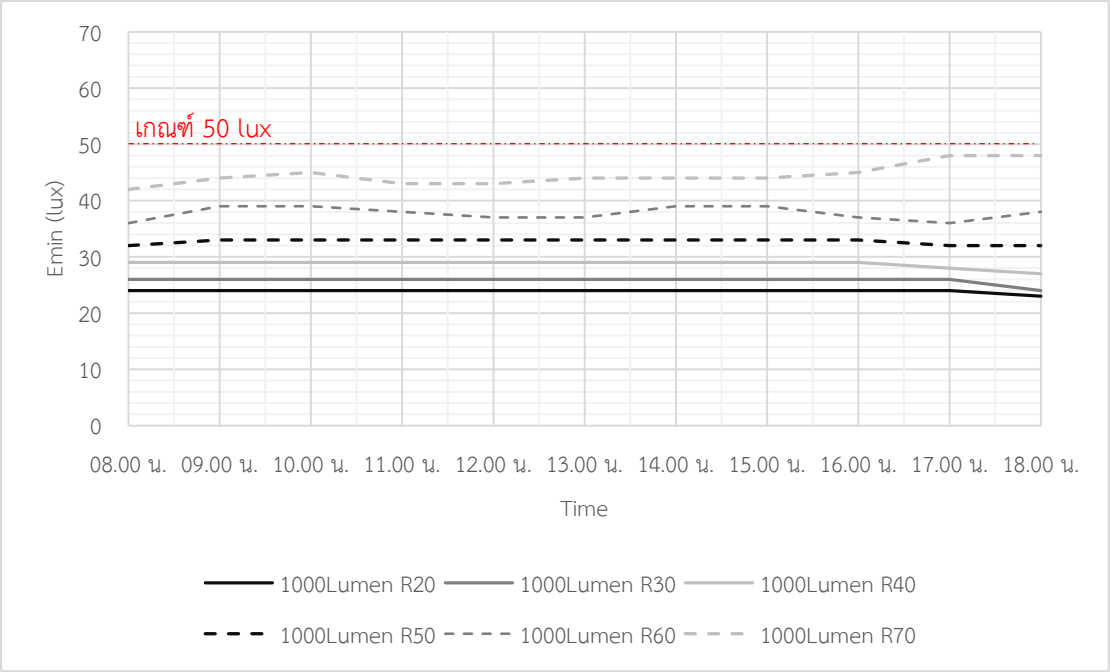
แผนภูมิที่ 4. 8 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 400 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน



แผนภูมิที่ 4. 9 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 600 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน

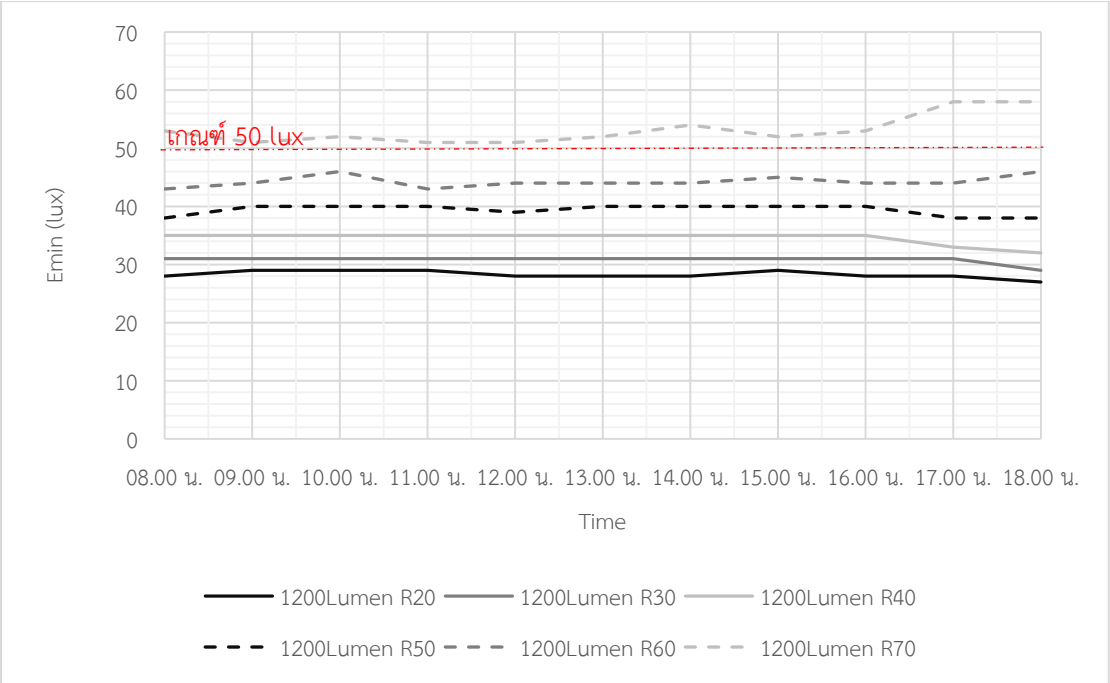


แผนภูมิที่ 4. 10 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 800 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน

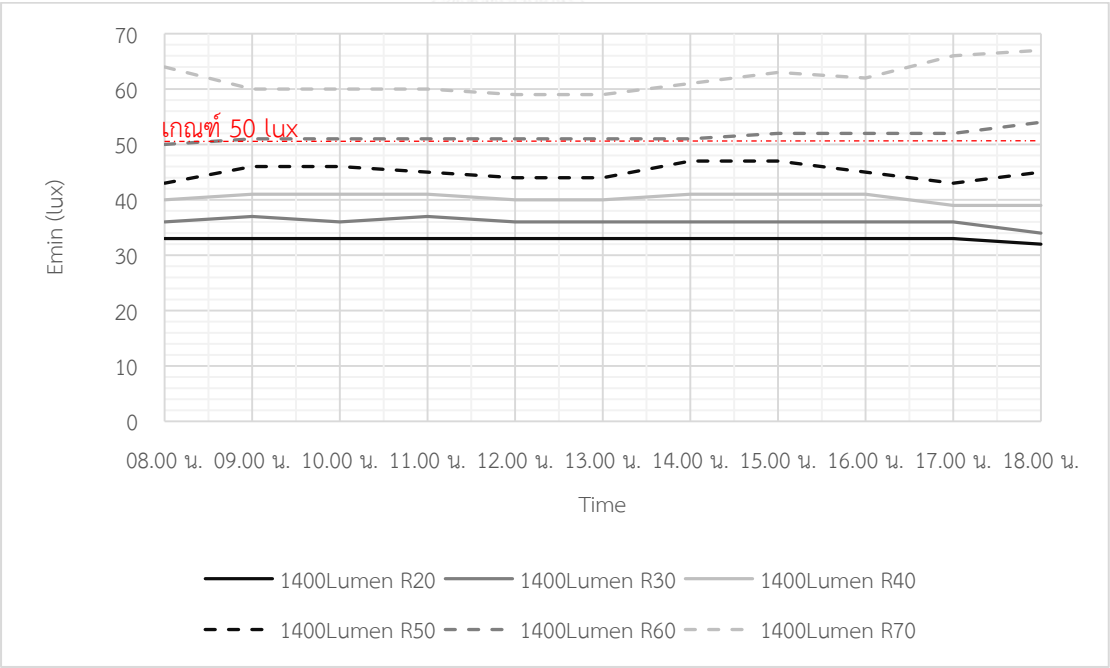


แผนภูมิที่ 4. 11 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,000 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



แผนภูมิที่ 4. 12 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,200 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน



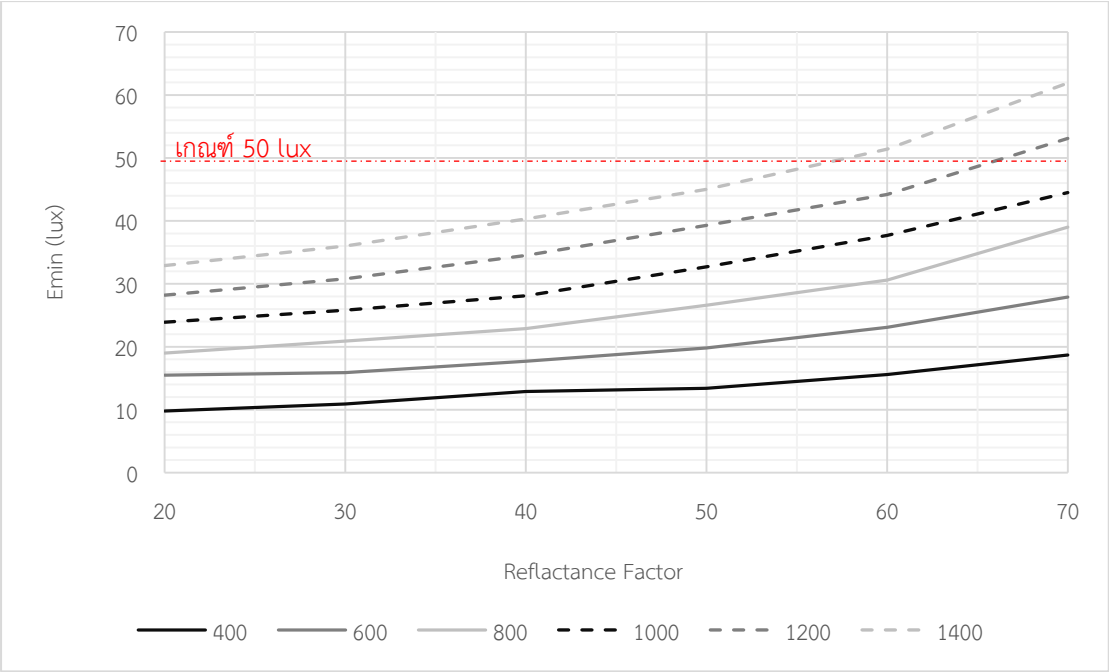
แผนภูมิที่ 4. 13 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,400 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน

ค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน ในพื้นที่คำนวณแสงสว่าง calculation grid 1 ที่อยู่ในตำแหน่งทางสัญจรยาวที่มีช่องเปิดหน้าต่างบริเวณสุดปลายทางเดินทั้งสองด้าน พบว่า ความสว่างมีค่าค่อนข้างจะสม่ำเสมอตลอดทั้งวัน ปริมาณแสงจากหลอดไฟที่เลือกใช้จะมีผลต่อความสว่างของพื้นที่ โดยหากต้องการให้พื้นที่ดังกล่าวมีค่าความสว่างตามเกณฑ์พื้นที่ทางสัญจร 50 lux ต้องเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,200 lumen ในพื้นที่ที่มีอัตราค่าสะท้อนของพื้นผิว 0.70 ขึ้นไป จะมีค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ย 53.1 lux หรือ เลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,400 lumen ในพื้นที่ที่มีอัตราค่าสะท้อนของพื้นผิว 0.60 และ 0.70 จะมีค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ย 51.4 และ 61.9 lux ตามลำดับ โดยหลอดไฟที่มีปริมาณแสง 400 lumen จะให้ค่าความสว่างไม่เพียงพอต่อการใช้ในทุกกรณี โดยการเลือกอัตราค่าสะท้อนของพื้นผิวและความสว่างของหลอดไฟที่เหมาะสมกับพื้นที่ จะแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 โดยเมื่อเปรียบเทียบกับการจำลองสถานการณ์แสงสว่างในวันที่ 21 ธันวาคม จะพบว่าวันดังกล่าวจะมีค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ยสูงกว่าวันที่ 21 มิถุนายน เป็นเหตุให้การเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 600 lumen และมีอัตราค่าสะท้อนของพื้นผิวที่ 0.50 จะมีค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ยไม่เพียงพอต่อเกณฑ์ทางสัญจรเบาบางที่ 20 lux

ตารางที่ 4. 2 แสดงค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เมื่อมีการใช้อัตราค่าสะท้อนของพื้นผิวและปริมาณความสว่างของหลอดไฟต่างๆกัน จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างในวันที่ 21 ธันวาคม

ปริมาณแสง	R 20%	R 30%	R 40%	R 50%	R 60%	R 70%
400 lumen	9.8	10.9	12.9	13.4	15.6	18.7
600 lumen	15.5	15.9	17.7	19.8	23.1	27.9
800 lumen	19	20.9	22.9	26.6	30.6	39
1000 lumen	23.9	25.8	28.1	32.7	37.7	44.5
1200 lumen	28.2	30.8	34.5	39.3	44.2	53.1
1400 lumen	32.9	36	40.3	45	51.4	61.9

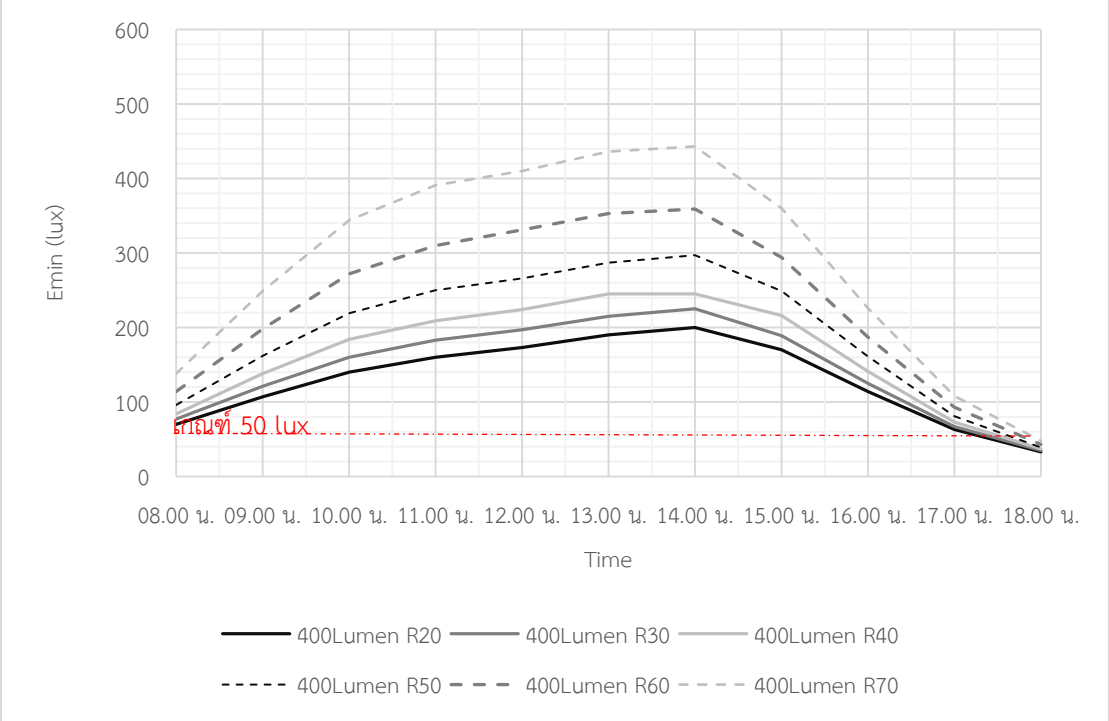
ในการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน อัตราค่าสะท้อนแสงที่อยู่ในช่วง 0.20-0.30 จะไม่ส่งผลมากนัก แต่เมื่อมีค่าตั้งแต่ 0.40 ขึ้นไปจะแสดงประสิทธิภาพได้เพิ่มมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น เมื่อเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณความสว่าง 1,400 lumen เมื่อมีอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในที่ 0.20 จะมีค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ย 32.9 lux แต่หากเพิ่มเป็น 0.70 ได้มีความสว่างเพิ่มขึ้นเป็น 61.9 lux เพิ่มขึ้นเป็นจำนวน 29 lux ซึ่งลดลงกว่าการจำลองสถานการณ์ในวันที่ 21 ธันวาคม จำนวน 2.5 lux แต่ประสิทธิภาพโดยรวมของค่าความสว่างถือว่าไม่ต่างกันมาก โดยจะสังเกตประสิทธิภาพได้จากแผนภูมิที่ 4.14



แผนภูมิที่ 4. 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในและปริมาณความสว่างจากหลอดไฟที่มีผลต่อความสว่างในพื้นที่ ของวันที่ 21 มิถุนายน พื้นที่การคำนวณแสงสว่าง calculation grid 1

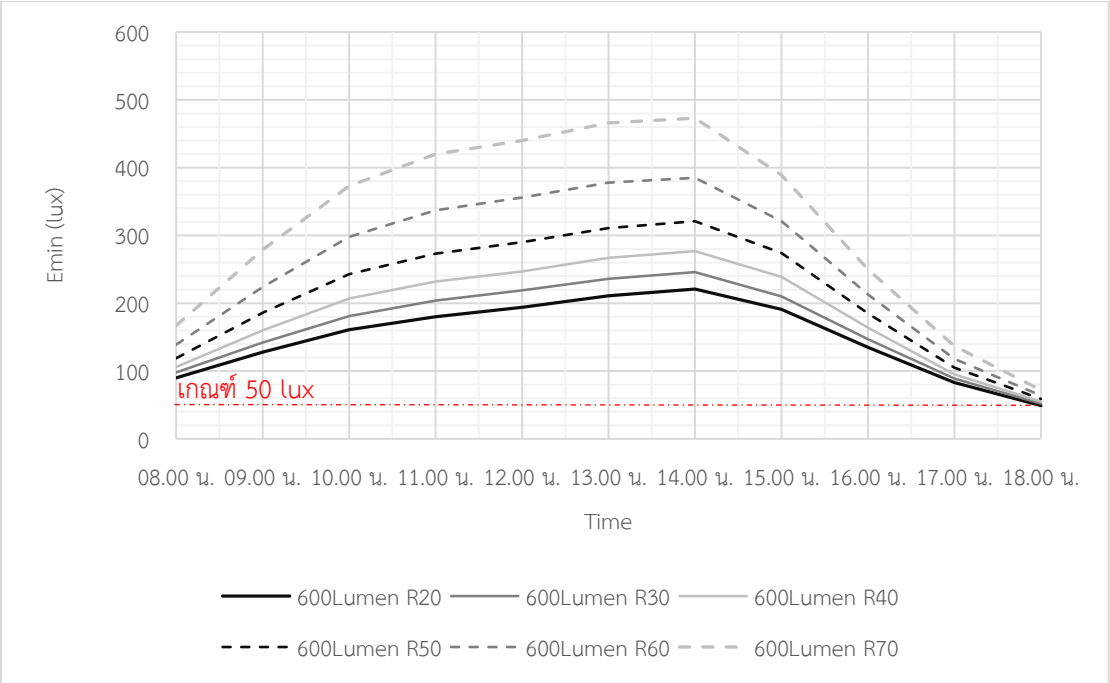
จะสังเกตได้ว่าช่วงเวลา 18.00 น. ของวันที่ 21 มิถุนายน ยังคงได้รับอิทธิพลจากแสงธรรมชาติอยู่ ซึ่งต่างจากวันที่ 21 ธันวาคมที่แสงธรรมชาติไม่มีอิทธิพลในพื้นที่แล้ว แต่เนื่องด้วยลักษณะทางกายภาพของพื้นที่คำนวณแสงสว่าง calculation grid 1 ที่มีความยาวมาก และมีพื้นที่เพียงส่วนน้อยที่อยู่ใกล้ช่องเปิดและได้รับอิทธิพลจากแสงธรรมชาติ ทำให้ช่วงเวลาดังกล่าวมีค่าแทบจะไม่ต่างกัน และทุกช่วงเวลาตั้งแต่ 08.00-18.00 ก็มีค่าความสว่างใกล้เคียงกัน แสงธรรมชาติจึงแทบจะไม่มีอิทธิพลต่อความสว่างของพื้นที่คำนวณแสงสว่าง calculation grid 1

4.1.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวกับความสว่างต่ำสุด (E_{AV}) ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม ในพื้นที่คำนวณแสงสว่าง calculation grid 2

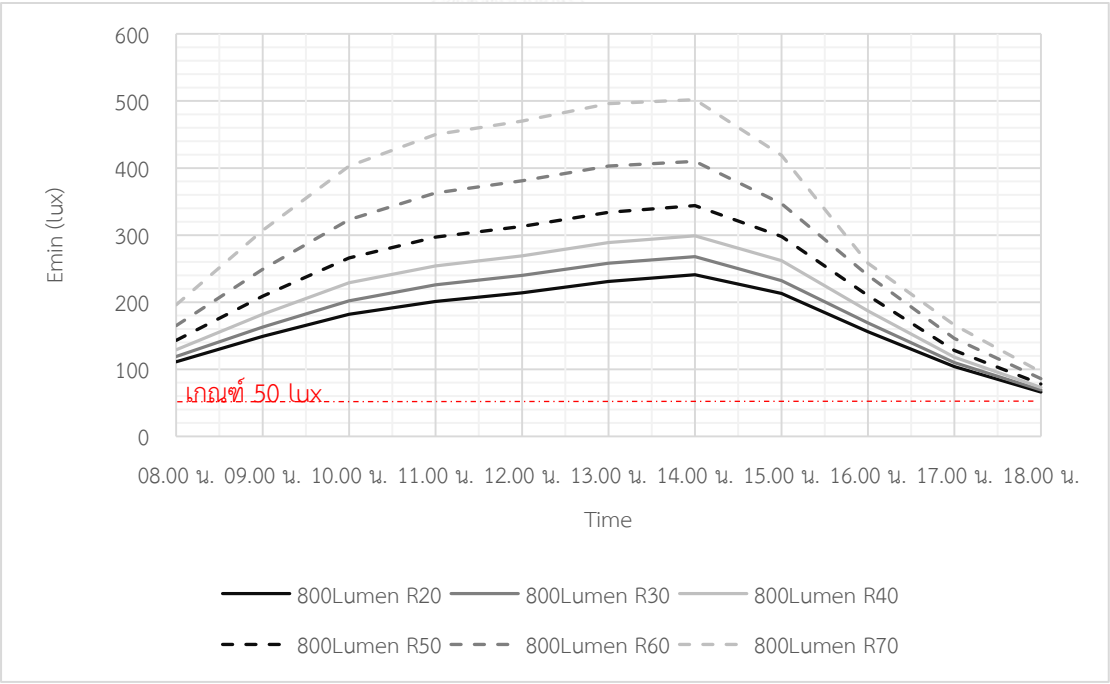


แผนภูมิที่ 4. 15 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 400 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน

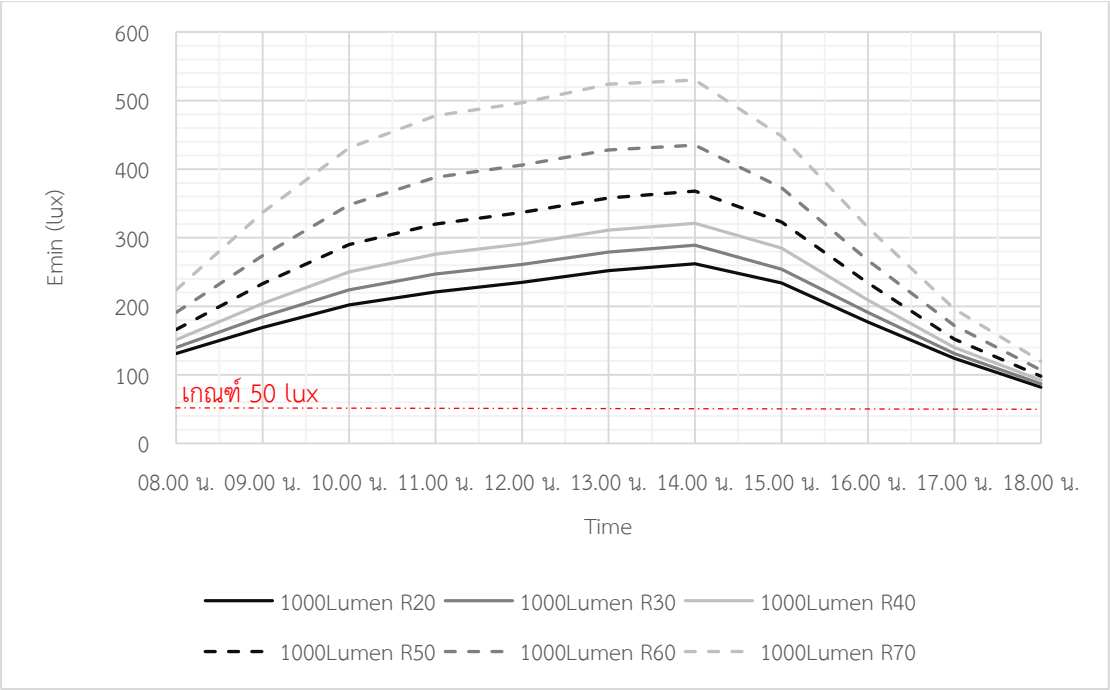
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



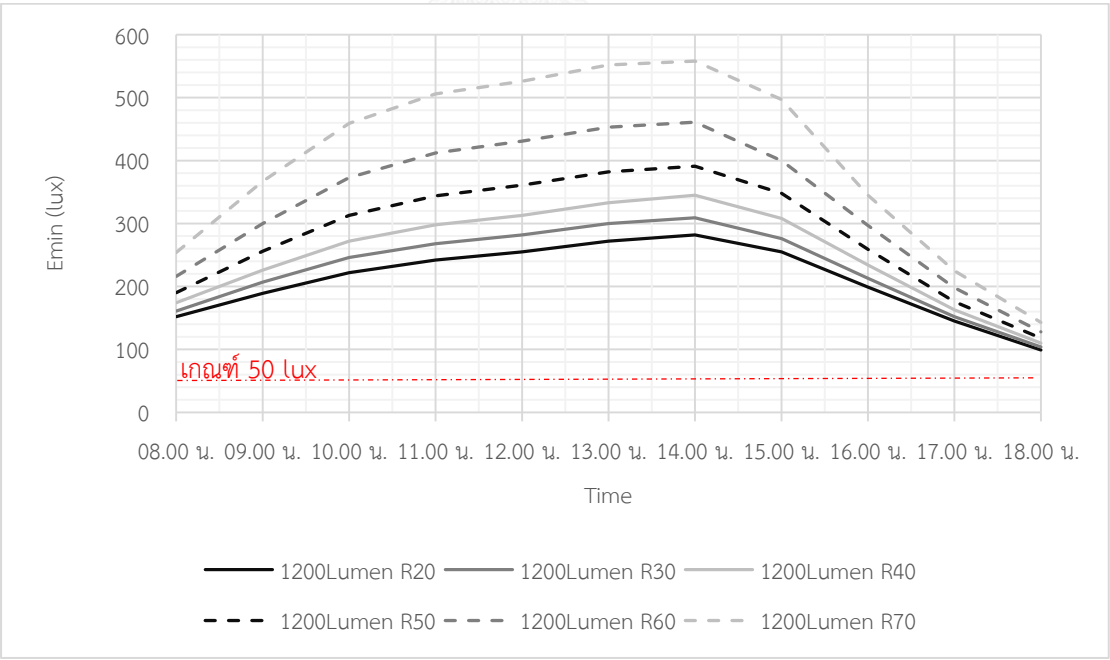
แผนภูมิที่ 4. 16 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 600 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน



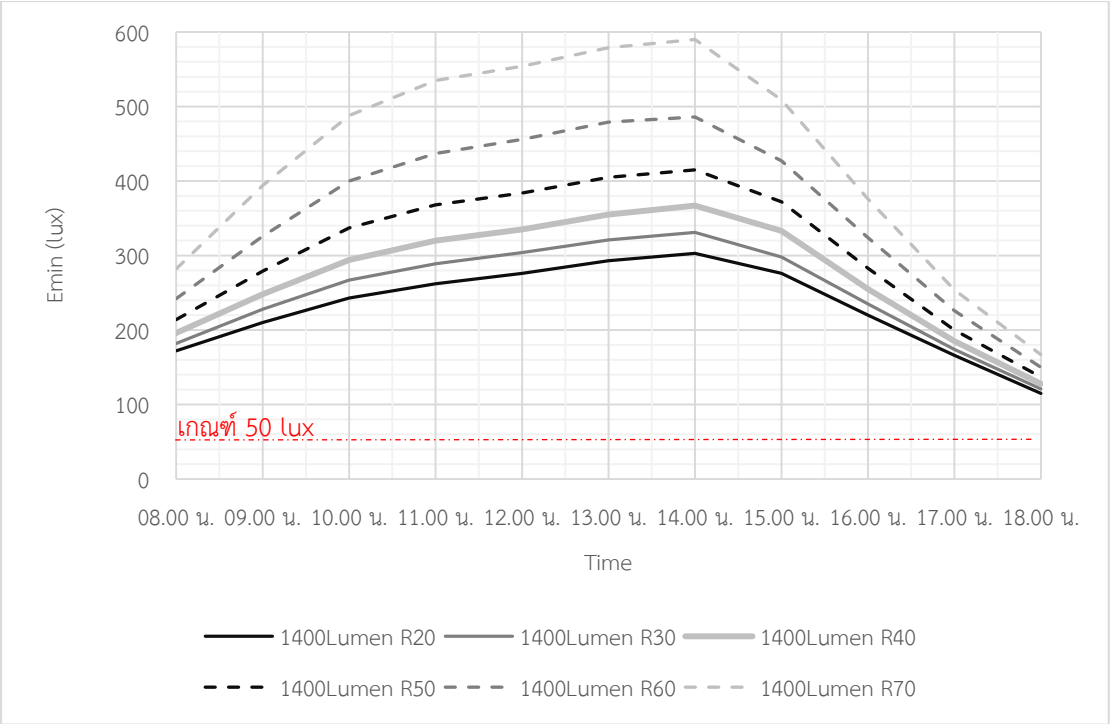
แผนภูมิที่ 4. 17 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 800 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน



แผนภูมิที่ 4. 18 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,000 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน



แผนภูมิที่ 4. 19 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,200 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน



แผนภูมิที่ 4. 20 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,400 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน

ค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 ธันวาคม ในพื้นที่คำนวณแสงสว่าง calculation grid 2 ที่อยู่ในตำแหน่งโถงลิฟต์ พบว่า ความสว่างจะเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลาของวัน ระดับของความสว่างจะจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และจะสูงสุดที่ช่วงเวลา 14.00 น. และจะค่อยๆ ลดลงในช่วงเย็น ปริมาณแสงจากหลอดไฟที่เลือกใช้แทบจะไม่มีผลต่อพื้นที่ในช่วงเวลากลางวันมากนัก เนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวได้รับอิทธิพลจากแสงธรรมชาติอย่างเต็มที่ โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 600 – 1400 lumen จะให้ค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ยที่เพียงพอต่อเกณฑ์ความสว่างพื้นที่ทางสัญจรในอาคารที่ 50 lux จะมีเพียงเพียงแต่สถานการณ์ที่ใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 400 lumen เท่านั้นในช่วงเวลา 18.00 ที่มีค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ยเพียง 39 lux ซึ่งไม่เพียงพอ ซึ่งจำเป็นต้องใช้แสงประดิษฐ์เพิ่มเติม

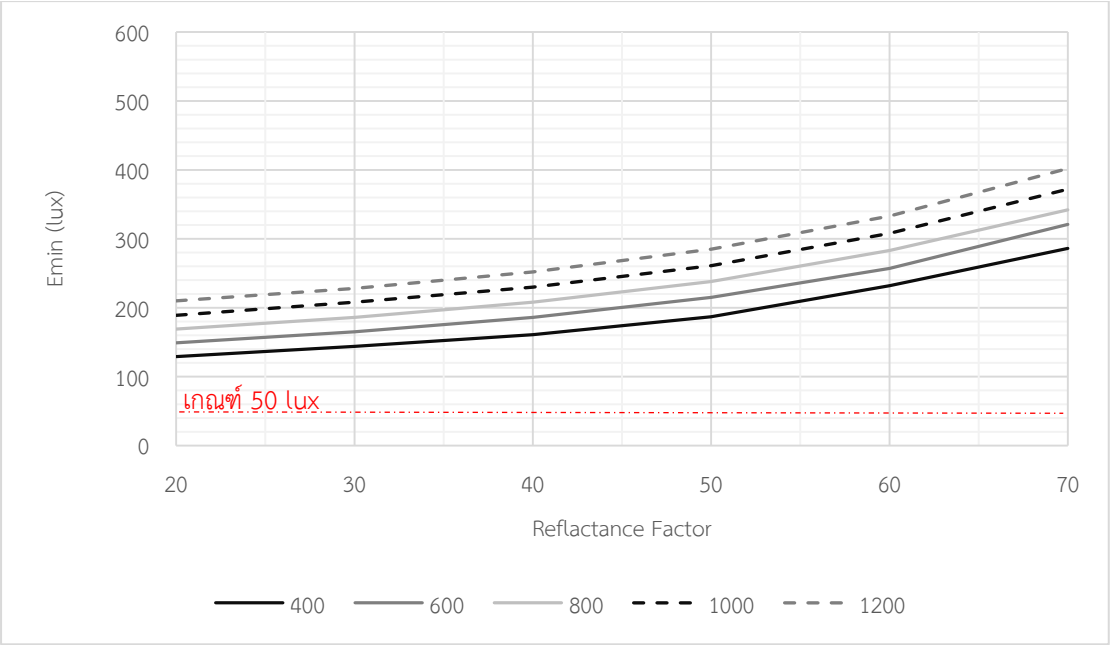
ในพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลจากแสงธรรมชาติ การเพิ่มค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวจะส่งผลต่อความสว่างในพื้นที่ได้มากกว่าการใช้หลอดไฟที่มีประสิทธิภาพ ตัวอย่างเช่น ช่วงเวลา 14.00 น. หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,000 lumen เมื่ออยู่ในพื้นที่ที่มีอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิว 0.20 จะมีค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ที่ 194 lux แต่เมื่อเพิ่มอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวเป็น 0.70 จะมีค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เป็น 440 lux ซึ่งเป็นการเพิ่มความสว่างมากกว่าเดิมถึง 246 lux ซึ่งให้ค่าความสว่างมากกว่าการเปลี่ยนประสิทธิภาพหลอดไฟปริมาณแสง 1,400 lumen โดยการเลือกอัตราค่าสะท้อนของพื้นผิวและความสว่างของหลอดไฟที่

เหมาะสมกับพื้นที่ จะแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 จะสังเกตได้ว่า ในพื้นที่โถงลิฟต์ เมื่อพิจารณาจาก ค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ย จะสามารถเลือกใช้หลอดไฟได้ทุกปริมาณความสว่าง

ตารางที่ 4. 3 แสดงค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ย เมื่อมีการใช้อัตราค่าสะท้อนของพื้นผิวและปริมาณความสว่างของหลอดไฟต่างๆกัน จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างในวันที่ 21 ธันวาคม calculation grid 2

ปริมาณแสง	R 20%	R 30%	R 40%	R 50%	R 60%	R 70%
400 lumen	129	144	161	187	232	286
600 lumen	149	165	186	215	257	321
800 lumen	169	186	208	238	283	342
1000 lumen	189	208	230	261	308	372
1200 lumen	210	228	252	285	333	402
1400 lumen	230	250	274	308	359	429

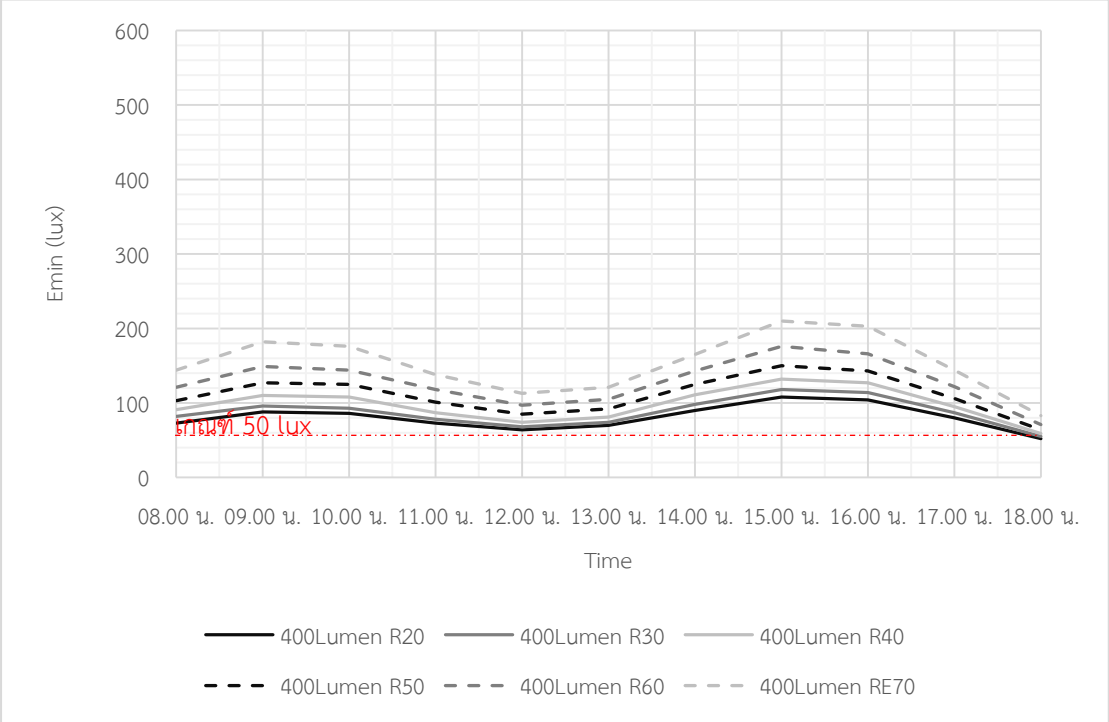
การจำลองสถานการณ์แสงสว่างในพื้นที่คำนวณแสงสว่าง calculation grid 2 ที่อยู่ในตำแหน่งโถงลิฟต์ เมื่อพิจารณาอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิว พบว่าช่วงเวลาที่มีปริมาณแสงธรรมชาติสูงระหว่างวัน จะส่งผลต่อค่าความสว่างในพื้นที่มากกว่าการเลือกใช้หลอดไฟที่มีประสิทธิภาพสูง ตัวอย่างเช่นการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสงสว่าง 400 lumen ในสถานการณ์ที่มีอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวเป็น 0.20 จะมีค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ย 129 lux หากเพิ่มอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวเป็น 0.60 จะมีค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 232 lux เทียบเท่ากับประสิทธิภาพเมื่อมีการเปลี่ยนหลอดไฟเป็น 1,400 lumen ที่ให้ค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ย 230 lux เมื่ออยู่ในสถานการณ์ที่มีอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวที่ 0.20 โดยประสิทธิภาพของของหลอดไฟเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวจะแสดงดังแผนภูมิที่ 4.21



แผนภูมิที่ 4. 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในและปริมาณความสว่างจากหลอดไฟที่มีผลต่อความสว่างในพื้นที่ ของวันที่ 21 ธันวาคม พื้นที่การคำนวณแสงสว่าง calculation grid 2

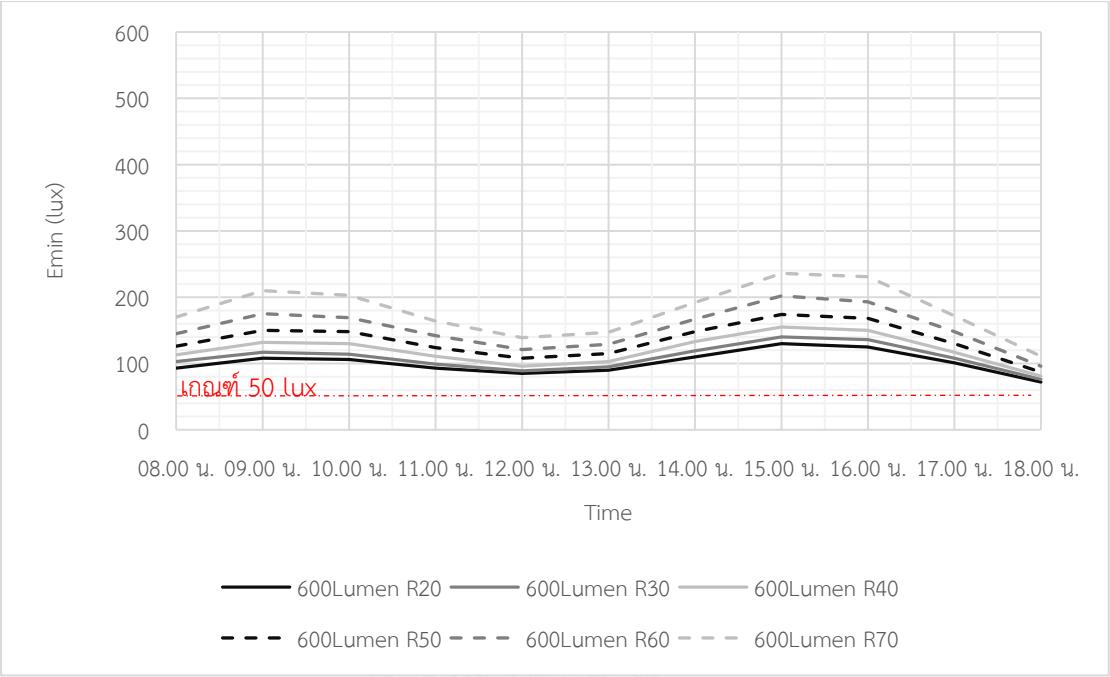
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.1.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวกับความสว่างต่ำสุด (E_{AV}) ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน ในพื้นที่คำนวณแสงสว่าง calculation grid 2

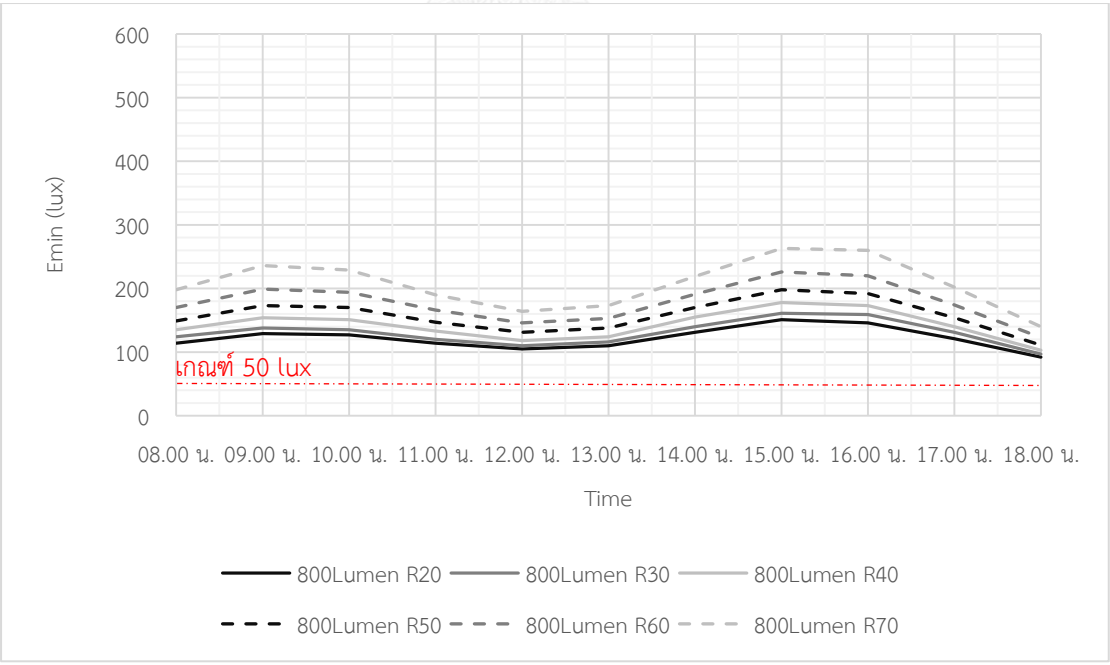


แผนภูมิที่ 4. 22 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 400 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน

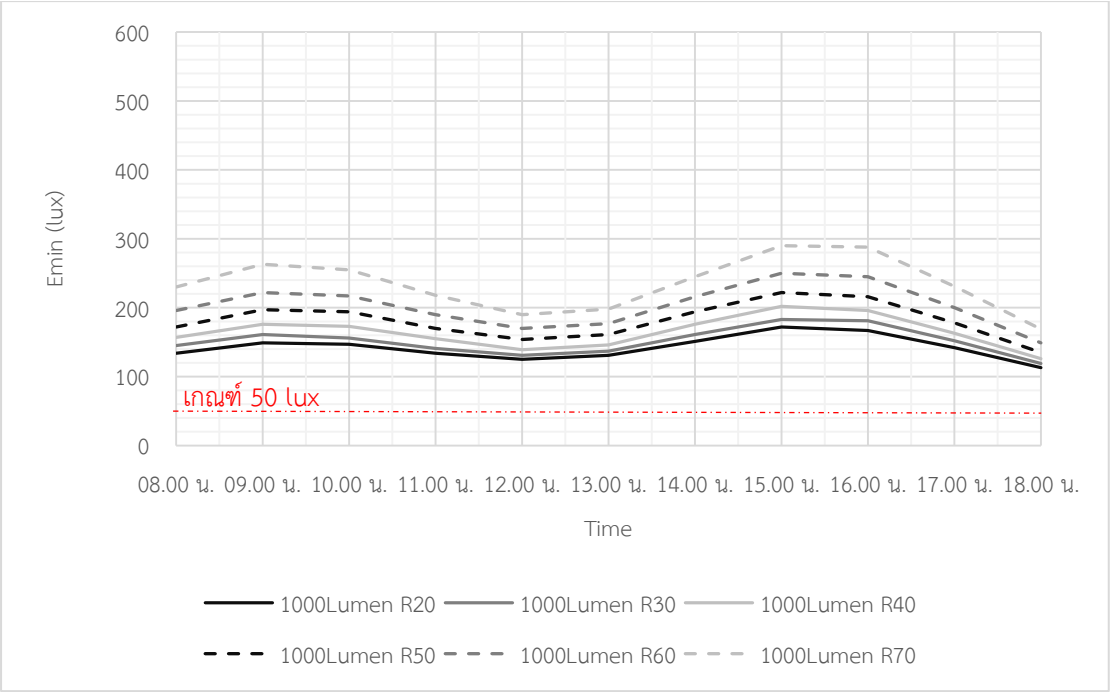
CHULALONGKORN UNIVERSITY



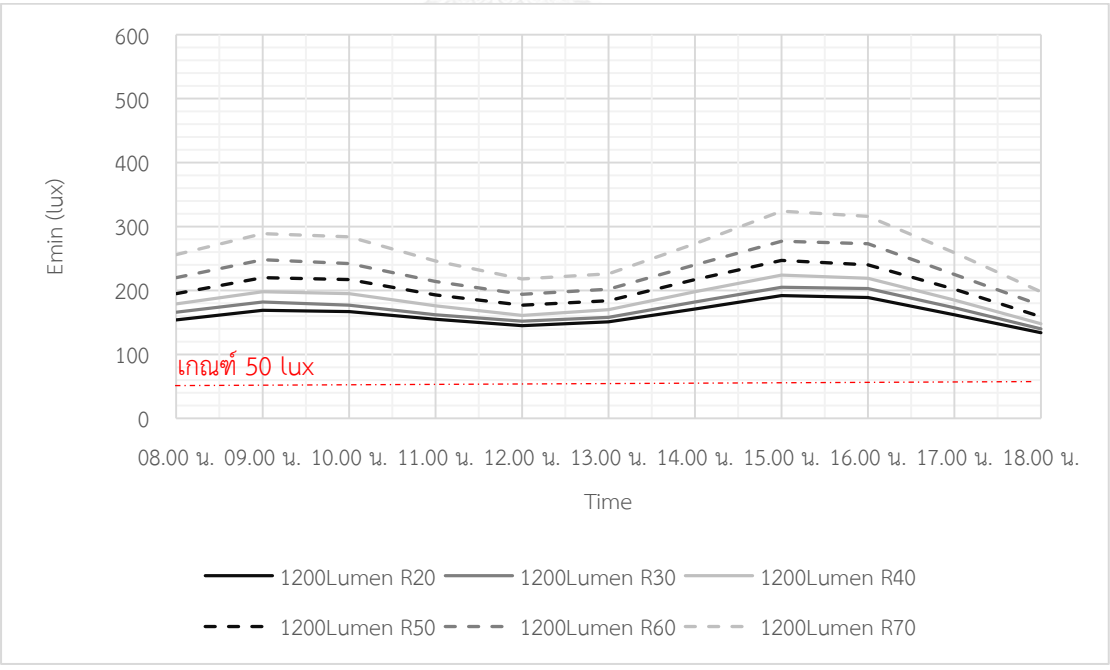
แผนภูมิที่ 4. 23 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 600 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน



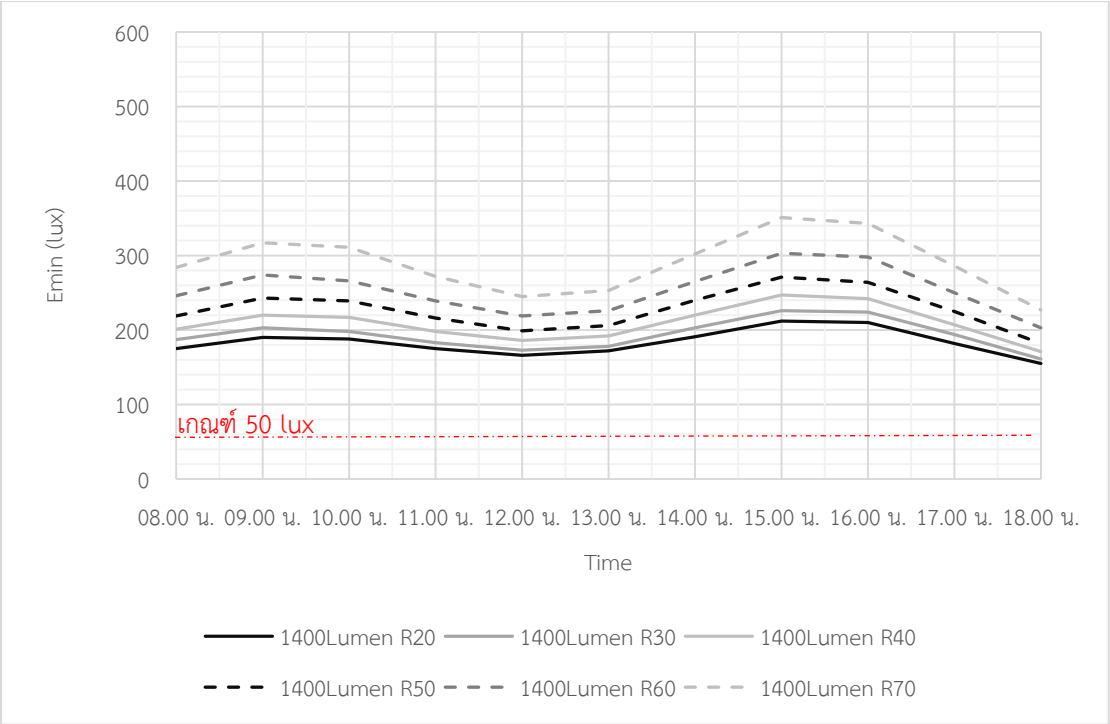
แผนภูมิที่ 4. 24 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 800 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน



แผนภูมิที่ 4. 25 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,000 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน



แผนภูมิที่ 4. 26 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,200 lumen เมื่อมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน



แผนภูมิที่ 4. 27 แสดงความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ในช่วงเวลาต่างๆ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน โดยการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,400 lumen เมื่อมีการใช้อัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวต่างๆกัน

ค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างของวันที่ 21 มิถุนายน ในพื้นที่คำนวณแสงสว่าง calculation grid 2 ที่อยู่ในตำแหน่งโถงลิฟต์ พบว่า ความสว่างจะเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลาของวัน ในช่วงเช้าระดับของความสว่างจะจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และจะสูงสุดที่ช่วงเวลา 10.00 น. และจะค่อยๆลดต่ำลงในช่วง 12.00 น. จากนั้นระดับของแสงสว่างจะค่อยๆเพิ่มขึ้นอีกครั้ง และจะสูงสุดในช่วงบ่ายเวลาประมาณ 15.00 น. จากนั้นจะค่อยลดลงในช่วงเย็น ซึ่งเป็นลักษณะของแสงธรรมชาติที่มีความแปรปรวนสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกับช่วงเวลาของ summer solstice ปริมาณแสงจากหลอดไฟที่เลือกใช้แทบจะไม่มีผลต่อพื้นที่ในช่วงเวลากลางวันมากนัก เนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวได้รับอิทธิพลจากแสงธรรมชาติ และจำลองสถานการณ์สองสว่างในช่วง summer solstice ที่มีช่วงเวลากลางวันยาวนานที่สุดในรอบปี ทำให้การเลือกใช้หลอดไฟได้ตั้งแต่ 400 lumen ขึ้นไปจะมีค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ยมากกว่าเกณฑ์ความสว่างพื้นที่ทางสัญจรในอาคารที่ 50 lux ในทุกกรณี

ในพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลจากแสงธรรมชาติ การเพิ่มค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวจะส่งผลต่อความสว่างในพื้นที่ได้มากกว่าการใช้หลอดไฟที่มีประสิทธิภาพ ตัวอย่างเช่น ช่วงเวลา 15.00 น. ที่มีระดับแสงธรรมชาติสูงสุดระหว่างวัน หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 1,000 lumen เมื่ออยู่ในพื้นที่ที่มีอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิว 0.20 จะมีค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) ที่ 172 lux แต่เมื่อเพิ่มอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวเป็น 0.70 จะมีค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เป็น 290 lux โดยการเลือกอัตราค่าสะท้อนของพื้นผิวและความสว่างของหลอดไฟที่

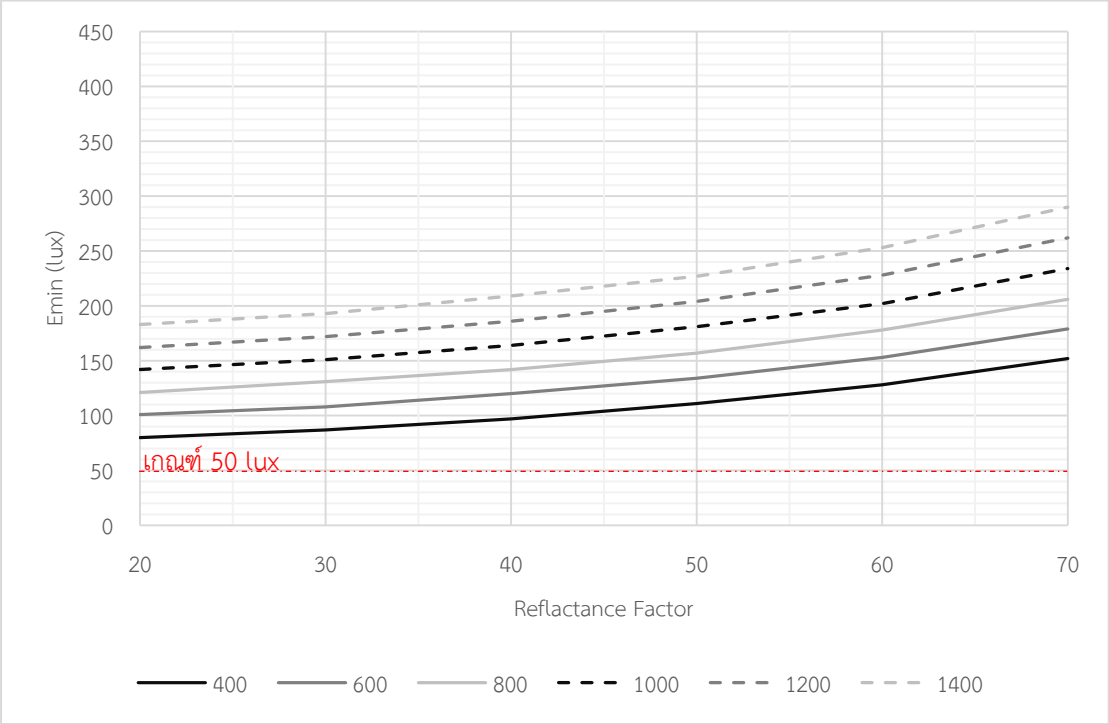
เหมาะสมกับพื้นที่ จะแสดงได้ดังตารางที่ 4.4 จะสังเกตได้ว่าในพื้นที่โถงลิฟต์ เมื่อพิจารณาจากค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ย จะสามารถเลือกใช้หลอดไฟได้ทุกปริมาณความสว่าง

ตารางที่ 4. 4 แสดงค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ย เมื่อมีการใช้อัตราค่าสะท้อนของพื้นผิวและปริมาณความสว่างของหลอดไฟต่างๆกัน จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างในวันที่ 21 ธันวาคม calculation grid 2

ปริมาณแสง	R 20%	R 30%	R 40%	R 50%	R 60%	R 70%
400 lumen	80	87	97	111	128	152
600 lumen	101	108	120	134	153	179
800 lumen	121	131	142	157	178	206
1000 lumen	142	151	164	181	202	234
1200 lumen	162	172	186	204	228	262
1400 lumen	183	193	209	227	253	290

การจำลองสถานการณ์แสงสว่างในพื้นที่คำนวณแสงสว่าง calculation grid 2 ที่อยู่ในตำแหน่งโถงลิฟต์ ในช่วง summer solstice เมื่อพิจารณาอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิว ต้องคำนึงถึงช่วงเวลาที่แสงธรรมชาติมีอิทธิพลต่อพื้นที่ พบว่าช่วงเวลาที่มีปริมาณแสงธรรมชาติสูง คือ 10.00 น. และ 15.00 น. จะให้ประสิทธิภาพแสงสว่างมากกว่าช่วง 12.00 น. ที่มีระดับแสงธรรมชาติลดต่ำลงมา และจะส่งผลต่อค่าความสว่างในพื้นที่มากกว่าการเลือกใช้หลอดไฟที่มีประสิทธิภาพสูงแต่ยังให้ประสิทธิภาพน้อยกว่าช่วง winter solstice ตัวอย่างเช่นการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสงสว่าง 400 lumen ในสถานการณ์ที่มีอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวเป็น 0.20 จะมีค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ย 80 lux หากเพิ่มอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวเป็น 0.60 จะมีค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 128 lux เทียบเท่ากับประสิทธิภาพเมื่อมีการเปลี่ยนหลอดไฟเป็นประมาณ 800 lumen ที่ให้ค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ย 121 lux เมื่ออยู่ในสถานการณ์ที่มีอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวที่ 0.20 ซึ่งน้อยกว่าช่วง winter solstice โดยประสิทธิภาพของของหลอดไฟเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวที่จะแสดงในแผนภูมิที่ 4.28

.



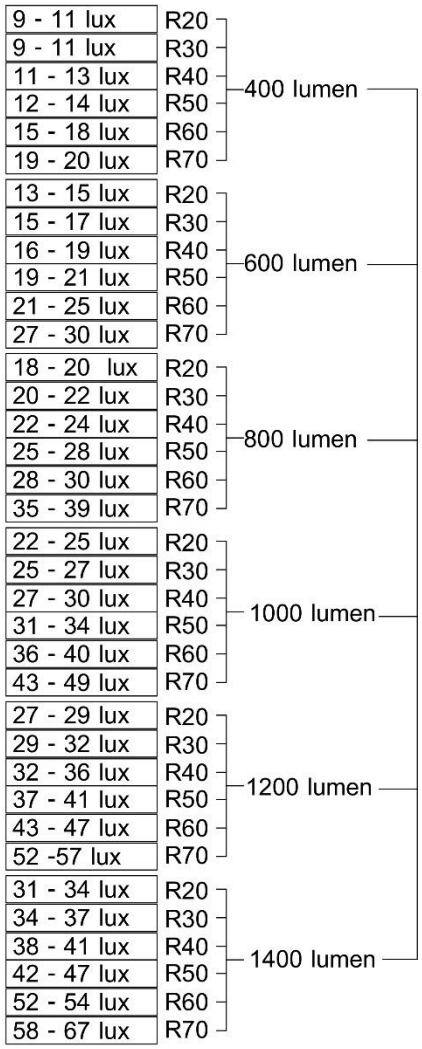
แผนภูมิที่ 4. 28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในและปริมาณความสว่างจากหลอดไฟที่มีผลต่อความสว่างในพื้นที่ ของวันที่ 21 ธันวาคม พื้นที่การคำนวณแสงสว่าง calculation grid 2

4.2 ศึกษาอัตราค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวและเลือกใช้ดวงโคมที่มีปริมาณแสงเพียงพอต่อการใช้งาน

จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างเพื่อทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวและประสิทธิภาพของดวงโคมที่ส่งผลต่อค่าความสว่างในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก และสามารถนำมาปรับปรุงอาคารดั้งเดิมให้มีค่าความสว่างตามเกณฑ์และนำข้อมูลไปพิจารณาร่วมกับการใช้อุปกรณ์ daylight sensor และ motion sensor ต่อไป

ด้วยลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักที่มีความยาวมาก และมีช่องเปิดรับแสงธรรมชาติอยู่ที่บริเวณสุดปลายทางเดินและโถงลิฟต์ เมื่อแบ่งตามพื้นที่การคำนวณแสงสว่าง calculation grid จะพบว่า บริเวณโถงลิฟต์ (calculation grid 2) จะไม่ประสบปัญหาเรื่องการเลือกใช้ดวงโคมเนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวมีช่องเปิดรับแสงธรรมชาติขนาดใหญ่ ในช่วงเวลากลางวันจึงมีค่าความส่องสว่างเพียบพอตามเกณฑ์ ส่วนบริเวณทางเดินยาว (calculation grid 1) พื้นที่นี้เป็นทางเดินที่ยาวและไม่กว้างนัก รวมถึงมีระดับฝ้าเพดานที่ต่ำ ทำให้มีแสงธรรมชาติมีอิทธิพลเฉพาะบริเวณใกล้ช่องเปิดหน้าต่าง พื้นที่ส่วนลึกต้องใช้ความสว่างจากแสงประดิษฐ์ที่มักมีค่าความสว่างไม่พียงพอตามเกณฑ์ จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่าง ผู้วิจัยจะทำการเลือกรูปแบบการจำลองแสงสว่างที่มีการใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสงสว่างน้อยที่สุดที่มี

ความสว่างเพียงพอต่อเกณฑ์ เพื่อการประหยัดพลังงานทั้ง calculation grid 1 และ calculation grid 2 และมีความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ยไม่ต่ำกว่าเกณฑ์ความสว่างที่ 50 lux โดยรูปแบบดังกล่าวคือการใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสงสว่าง 1200 lumen และมีอัตราค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวคือ 0.70 โดยจะให้ความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ยทุกช่วงเวลา ในวันที่ 21 ธันวาคม คือ 55 lux และวันที่ 21 มิถุนายน คือ 53 lux ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานและสามารถนำมาใช้พิจารณาการลดการใช้ดวงโคมเมื่อมีการใช้อุปกรณ์ daylight sensor และหรี่ไฟเมื่อมีการใช้อุปกรณ์ motion sensor โดยค่าความส่องสว่างในพื้นที่ calculation grid 1 เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 2 วันสำคัญจะมีค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) แสดงดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4. 1 แสดงค่าความสว่างต่ำสุด E_{min} ในพื้นที่ calculation grid 1 เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 2 วันสำคัญ

จากภาพที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มระดับความส่องสว่างในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักสามารถทำได้ทั้งการเพิ่มปริมาณแสงจากหลอดไฟหรือการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุ โดยการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุจะช่วยส่งเสริมการเพิ่มปริมาณแสงจากหลอดไฟให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น ในพื้นที่ที่มีการใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสง 800 lumen การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงจาก 10% เป็น 20% จะเพิ่มระดับความสว่างได้เพียง 2 lux แต่ถ้าหากเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวจาก 60% เป็น 70% จะเพิ่มระดับความสว่างได้ถึง 7 - 9 lux

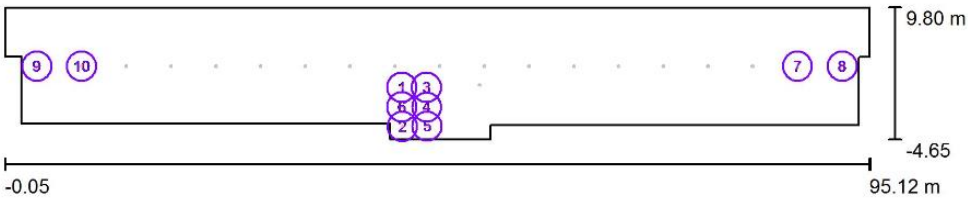
พื้นที่ที่มีค่าสะท้อนแสงของพื้นผิว 20% การเพิ่มปริมาณแสงจากหลอดไฟขึ้น 200 lumen จะช่วยให้พื้นที่ดังกล่าวมีค่าความสว่างเพิ่มขึ้น 3 – 5 lux หากพื้นที่ที่มีค่าสะท้อนแสงของพื้นผิว 50% การเพิ่มปริมาณแสงจากหลอดไฟขึ้น 200 lumen จะช่วยให้พื้นที่ดังกล่าวมีค่าความสว่างเพิ่มขึ้น 6 – 8 lux โดยค่าความสว่างที่เพิ่มขึ้นแบบส่งเสริมกันนี้ แสดงให้เห็นได้ในแผนภูมิที่ 4.7 และ แผนภูมิที่ 4.14

4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของ daylight sensor และ motion sensor

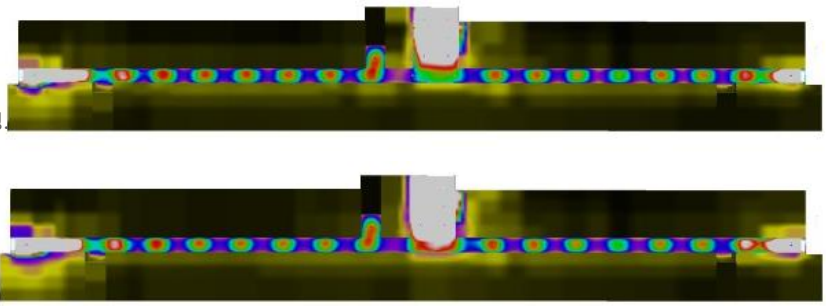
4.2.1 การศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของ daylight sensor

แสงธรรมชาติจะมีอิทธิพลต่อพื้นที่ใกล้ช่องเปิด การหรี่ไฟจะทำโดยอัตโนมัติเมื่อมีการการติดตั้งอุปกรณ์ daylight sensor และจะทำการหรี่ไฟเมื่อมีความสว่างเพียงพอต่อระดับ 50 lux ในงานวิจัยชิ้นนี้โดยจะทำการศึกษาถึงลักษณะแสงธรรมชาติตั้งแต่เวลา 08.00 – 18.00 น ทั้ง 2 วันสำคัญที่ทำการศึกษา จะทำการกำหนดทางเลือกของการหรี่ไฟในแต่ละรูปแบบ (ดูตารางที่ 3.3) ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยมีรายละเอียดการลดการใช้ดวงโคมรายและค่าฟ้าที่ลดลงชั่วโมง (อ้างอิงตามสมการการคิดค่าไฟฟ้าอย่างง่ายของการไฟฟ้านครหลวง) โดยอัตราค่าไฟฟ้าที่ใช้ในโครงการจากการเก็บข้อมูลย้อนหลังสุด 3 เดือนจากนิติบุคคลโครงการ Plum condominium พบว่ามีอัตราค่าไฟฟ้ายูนิตละ 4.22 บาท

Chulalongkorn University



ภาพที่ 4. 2 ตัวอย่างการตั้งรูปแบบ A การลดการใช้ดวงโคม ในโปรแกรม DIALux 4.12



ภาพที่ 4. 3 ตัวอย่างการจำลองสถานการณ์แสงสว่างจากการใช้ชุดคำสั่งต่างๆของอุปกรณ์ daylight sensor เพื่อทดสอบค่าความสว่างเฉลี่ย (E_{min}) ของวันที่ 21 ธันวาคม ช่วงเวลา 09.00 น. – 10.00 น.

ปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่ลดลงรายชั่วโมง (W/hr) = $\frac{N \times 12}{}$ ---------- (2)

ค่าไฟฟ้าที่ลดลงรายชั่วโมง **(บาท)** = $\frac{N \times 12 \times 4.22}{1,000}$ ---------- (3)

โดย N คือจำนวนดวงโคมที่ลดการใช้งาน

ตารางที่ 4. 5 แสดงประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ daylight sensor ของวันที่ 21 ธันวาคม

เวลา	รูปแบบ	จำนวนดวงโคมที่ลดการใช้งาน (โคม)	E_{min} ในพื้นที่ calculation grid 1 (lux)	E_{min} ในพื้นที่ calculation grid 2 (lux)	ปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่ลดลง (W/hr)	ค่าไฟฟ้าที่ลดลง (บาท)
08.00 น.	D	6	61	121	72	0.30
09.00 น.	C	8	52	193	96	0.40
10.00 น.	B	10	57	287	120	0.50
11.00 น.	A	12	57	332	144	0.60
12.00 น.	A	12	50	404	144	0.60
13.00 น.	A	12	52	427	144	0.60
14.00 น.	A	12	59	391	144	0.60
15.00 น.	B	10	62	509	120	0.50
16.00 น.	B	10	51	172	120	0.50
17.00 น.	D	6	63	254	72	0.30
18.00 น.	-	-	-	-	-	-
รวมทั้งวัน					1,162	4.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4. 6 แสดงประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ daylight sensor ของวันที่ 21 มิถุนายน

เวลา	รูปแบบ	จำนวนดวงโคมที่ลดการใช้งาน (โคม)	E_{min} ในพื้นที่ calculation grid 1 (lux)	E_{min} ในพื้นที่ calculation grid 2 (lux)	ปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่ลดลง (W/h)	ค่าไฟฟ้าที่ลดลง (บาท)
08.00 น.	D	6	60	127	72	0.30
09.00 น.	C	8	56	317	96	0.40
10.00 น.	B	10	56	311	120	0.50
11.00 น.	A	12	56	272	144	0.60
12.00 น.	B	10	56	245	120	0.50
13.00 น.	C	8	56	253	96	0.40
14.00 น.	B	10	58	260	120	0.60
15.00 น.	A	12	60	351	144	0.60
16.00 น.	C	8	60	311	96	0.40
17.00 น.	D	6	63	286	72	0.30
18.00 น.	D	6	63	227	72	0.30
รวมทั้งวัน					1,162	4.9

จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 แสดงให้เห็นว่าการทดสอบประสิทธิสภาพแสงสว่างโดยการใช้ชุดคำสั่งที่กำหนดของอุปกรณ์ daylight sensor ค่าความส่องสว่างต่ำสุด (E_{min}) มีค่ามากกว่าเกณฑ์มาตรฐานความสว่างในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักที่ 50 lux ทุกกรณี ทั้งพื้นที่ทางเดินยาว calculation grid 1 และ พื้นที่โถงลิฟต์ calculation grid 2 โดยจะแสดงการประมาณการลดค่าไฟฟ้าที่ได้รายชั่วโมง โดยที่ทั้ง 2 วันสำคัญนั้นการใช้ชุดคำสั่งต่างกัน และมีรูปแบบแสงธรรมชาติต่างกัน โดยช่วงวันที่ 21 มิถุนายน หรือ summer solstice พบว่าแสงธรรมชาติยังคงมีอิทธิพลกับพื้นที่อยู่ ซึ่งต่างจากช่วง 21 ธันวาคม หรือ winter solstice ที่ไม่มีแสงธรรมชาติแล้ว แต่เมื่อคิดค่าการประหยัดพลังงานจากสูตรคำนวณค่าไฟฟ้าอย่างง่ายนั้น พบว่ามีการลดการใช้พลังงานได้ 1,162 W/hr /ชั้น/วัน คิดเป็นมูลค่าลดค่าใช้จ่ายไฟฟ้า 4.9 บาท/ชั้น/วัน หรือคิดเป็น 423 kWh/yr หรือลดค่าใช้จ่ายไฟฟ้าได้ถึง 1,788 บาท/ชั้น/ปี

4.2.2 การศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของ motion sensor

การใช้ motion sensor เพื่อหรี่ไฟให้มีค่าความสว่างใกล้เคียงเกณฑ์พื้นที่ทางสัญจรเบาบางที่ 20 lux เป็นสิ่งที่จะนำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้ โดยที่จะทำการทดสอบโดยการตั้งค่า Dimming value อัตรา

50% - 80% ในการจำลองสถานการณ์แสงสว่าง ให้มีค่าความสว่างมากกว่า 20 lux ตามเกณฑ์พื้นที่ทางสัญจรเบาบาง แบ่งการทำงานออกเป็น 2 ช่วงเวลาคือ

1) ช่วงเวลา 10.00 น. – 16.00 น. ช่วงวันจันทร์ – วันศุกร์ เป็นช่วงเวลาที่จะมีผู้ใช้งานอย่างเบาบางเนื่องจากเป็นเวลาที่ผู้พักอาศัยออกไปทำงาน โดยจะพิจารณาในพื้นที่ที่ไม่ซ้อนทับการทำงานของ daylight sensor จะมีการใช้ดวงโคมทั้งสิ้น 16 ดวงโคม ตามรายละเอียดภาพที่ 3.25
2) ช่วงเวลา 23.00 น. – 06.00 น. เป็นช่วงเวลากลางคืนที่มีผู้ใช้งานอย่างเบาบางเนื่องจากเป็นเวลาพักผ่อน โดยจะไม่พิจารณาในพื้นที่โถงลิฟต์ที่ต้องการให้พื้นที่ดังกล่าวเปิดไฟเต็มประสิทธิภาพในช่วงเวลากลางคืน ด้วยเหตุผลเรื่องความปลอดภัย จะมีการใช้ดวงโคมทั้งสิ้น 22 ดวงโคม ตามรายละเอียดภาพที่ 3.26 และจะสามารถคำนวณหาค่าการลดการใช้พลังงานได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ค่าไฟฟ้าที่ลดลงช่วงเวลากลางวัน (บาท)} = \frac{N(16) \times (12 \times Dim\%) \times Hr(6) \times 4.22}{1{,}000} \quad \text{---------- (4)}$$

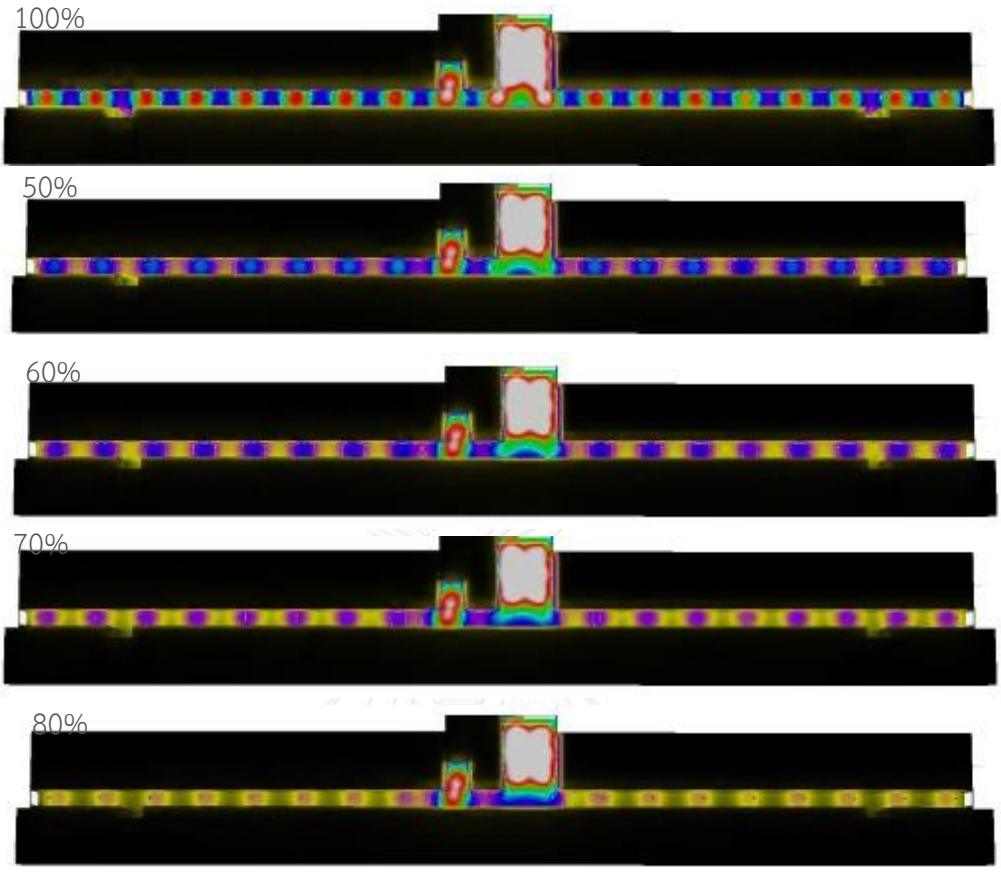
$$\text{ค่าไฟฟ้าที่ลดลงช่วงเวลากลางคืน (บาท)} = \frac{N(22) \times (12 \times Dim\%) \times Hr(7) \times 4.22}{1{,}000} \quad \text{---------- (5)}$$

โดย N คือ จำนวนดวงโคมที่อยู่ในขอบเขตการทำงานของอุปกรณ์

Dim% คือ **%**ของการหรี่ไฟ

โดย Hr คือ จำนวนชั่วโมงที่อยู่ในขอบเขตการทำงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 4. 4 ตัวอย่างการจำลองสถานการณ์แสงสว่างในช่วงเวลากลางคืนเมื่อมีการใช้อุปกรณ์ motion sensor ที่ตั้งค่าการหรี่ไฟตั้งแต่ 50% – 80%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4. 7 แสดงประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ motion sensor ในช่วงเวลากลางคืน เมื่อตั้งค่าการหรี่ไฟตั้งแต่50% – 80% พิจารณาในพื้นที่ทางสัญจรยาว calculation grid 1

อัตราการหรี่ไฟ (%)	E_{min} (lux)	ค่าใช้จ่ายไฟฟ้าที่ลดลงต่อชั่วโมงช่วงเวลากลางวัน (16 ดวงโคม ใน 6 ชม.) (บาท)	ค่าใช้จ่ายไฟฟ้าที่ลดลงต่อชั่วโมงช่วงเวลากลางคืน (22 ดวงโคม ใน 7 ชม.) (บาท)	ปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่ลดลงต่อวัน (W/h)	ค่าไฟฟ้าที่ลดลงต่อวัน (บาท)
Base case	65	-	-	-	-
50%	33	2.40	3.90	1,492	6.30
55%	29	2.67	4.29	1,649	6.96
60%	26	2.91	4.67	1,796	7.58
65%	22	3.15	5.06	1,945	8.21
70%	19	3.40	5.45	2,097	8.85
75%	16	3.64	5.84	2,331	9.84
80%	13	3.88	6.23	2,395	10.11

จากตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าการทดสอบประสิทธิสภาพแสงสว่างโดยการหรี่ไฟ โดยอัตราการหรี่ไฟที่เหมาะสมที่สุดคือการหรี่ไฟ 65% ค่าความส่องสว่างต่ำสุด (E_{min}) มีค่า 22 lux ซึ่งมากกว่าเกณฑ์มาตรฐานความสว่างในพื้นที่ทางสัญจรเบาบาง จากการพิจารณาพบว่าการใช้อุปกรณ์ motion sensor สามารถลดการใช้พลังงานได้ 1,945 W/hr /ชั้น/วัน คิดเป็นมูลค่าลดค่าใช้จ่ายไฟฟ้า 8.21 บาท/ชั้น/วัน หรือคิดเป็น 625 kWh/yr หรือลดค่าใช้จ่ายไฟฟ้าได้ถึง 2,640 บาท/ชั้น/ปี (พิจารณาการใช้งาน motion sensor ในช่วงเวลากลางวันเฉพาะวันจันทร์ – วันศุกร์ ส่วนช่วงเวลากลางคืนจะพิจารณาทุกวัน)

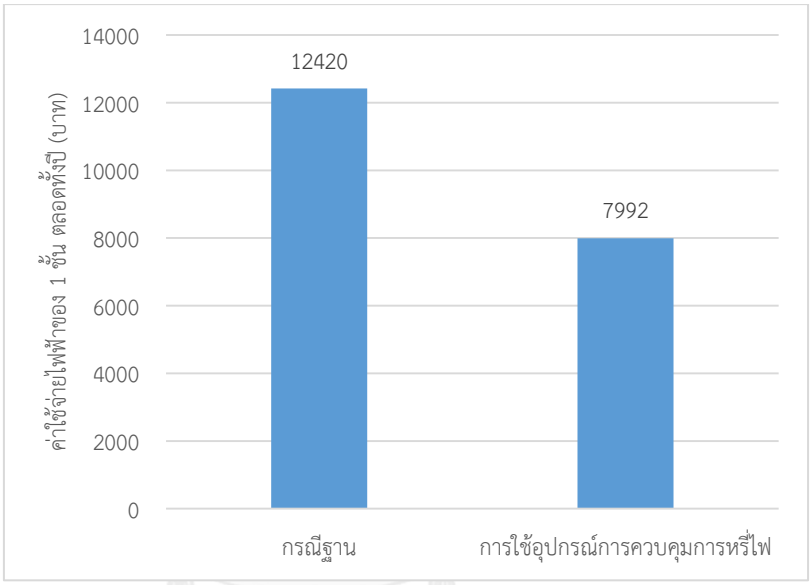
เมื่อพิจารณาการใช้อุปกรณ์ควบคุมการหรี่ไฟอัตโนมัติทั้ง 2 ระบบ ร่วมกันคือ daylight sensor และ motion sensor ในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักจะสามารถลดการใช้ค่าใช้จ่ายไฟฟ้าได้ประมาณ 1,049 kWh/yr หรือลดค่าใช้จ่ายไฟฟ้าได้ถึง 4,428 บาท/ชั้น/ปี

ปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่ใช้ในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก โครงการ Plum condominium โดยสมการการคิดค่าไฟฟ้าอย่างง่าย อ้างอิงตามสมการที่(1) ที่มีการจัดวางผังไฟฟ้าใหม่และในรูปแบบการเปิดสลับวงจรไฟฟ้าตลอดทั้งปี พบว่าแต่ละชั้นจะมีการใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 2,943 kWh/yr หรือคิดเป็น

ประมาณ 12,420 บาท/ชั้น/ปี โดยการใช้อุปกรณ์ควบคุมการหรี่ไฟเพื่อการประหยัดพลังงานพิจารณาการใช้งานในขอบเขต

1) การใช้ daylight sensor ในช่วงเวลากลางวันในพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลจากแสงธรรมชาติ
2) การใช้ motion sensor ในช่วงเวลากลางวัน ที่มีผู้ใช้งานอย่างเบาบาง
3) การใช้ motion sensor ในช่วงเวลากลางคืน ที่มีผู้ใช้งานอย่างเบาบาง

โดยในลักษณะการใช้งานที่มีการเปิดไฟไว้ตลอด 24 ชม. จะสามารถลดค่าใช้จ่ายไฟฟ้าได้ถึง 4,428 บาท/ชั้น/ปี หรือคิดเป็น 35.65% ตามที่แสดงในแผนภูมิที่ 4.29



แผนภูมิที่ 4. 29 แสดงค่าใช้จ่ายไฟฟ้าใน 1 ชั้น ของพื้นที่ทางเดินห้องพัก Plum condominium เปรียบเทียบกับเมื่อมีการใช้อุปกรณ์ควบคุมการหรี่ไฟเพื่อประหยัดพลังงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลอง สามารถสรุปการวิจัยได้ตามหัวข้อต่อไปนี้

5.1.1 ปัญหาแสงสว่างที่เกิดขึ้นในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักภายในโครงการคอนโดมิเนียมและแนวทางการแก้ไข

จากการเข้าสำรวจพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก อาคารคอนโดมิเนียม พบว่ายังมีค่าความสว่างไม่เพียงพอตามเกณฑ์พื้นที่ทางสัญจรในอาคาร 50 lux ซึ่งปัญหาดังกล่าวจะเกิดขึ้นในพื้นที่ที่มีลักษณะทางกายภาพเป็นทางเดินที่ยาวและมีขนาดไม่กว้างนัก มีระดับฝ้าเพดานที่ต่ำ ทำให้ได้รับอิทธิพลจากแสงธรรมชาติเฉพาะบริเวณใกล้ช่องเปิดเท่านั้น ทำให้ส่วนลึกของพื้นที่ต้องอาศัยความสว่างจากแสงประดิษฐ์เท่านั้น และมักมีความสว่างไม่เพียงพอตามเกณฑ์ สาเหตุมาจากการวางผังไฟฟ้าที่ไม่เหมาะสมและการเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสงน้อยและไม่พียงพอต่อการใช้งานในพื้นที่

โดยการออกแบบผังไฟฟ้าของโครงการ plum condominium ดั้งเดิมนั้น มีการวางวงจรไฟฟ้าไว้เพียงวงจรเดียว ซึ่งไม่รองรับการใช้งานที่มีการเปิดไฟตลอด 24 ชม. เนื่องจากจะไม่มีช่วงเวลาพักการใช้งานของดวงโคม ซึ่งส่งผลเสียต่ออายุการใช้งานของหลอด ทางโครงการจึงต้องมีการเปลี่ยนแปลงวงจรฟ้าใหม่เป็น 2 วงจร เพื่อให้มีการใช้งานได้สลับกับวงจรจะ 12 ชม. ปัญหาดังกล่าวจึงทำให้พื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก มีค่าความสว่างไม่เพียงพอตามเกณฑ์ 50 lux เนื่องจากจะมีระยะห่างของดวงโคมที่มากขึ้น โดยที่ปริมาณแสงจากดวงโคมยังเท่าเดิม ซึ่งปัญหาดังกล่าว มีแนวทางการแก้ไขดังนี้

1) การเปลี่ยนจากหลอด **compact fluorescent** เป็น หลอด LED

สิ่งที่ควรจะทำเป็นอันดับแรกในทุกโครงการที่มีอยู่ในปัจจุบันหรือโครงการใหม่ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต คือการเปลี่ยนหลอดไฟจากเดิม compact fluorescent ให้เป็นหลอดไฟ LED ที่มีประสิทธิภาพสูงและมีค่าความส่องสว่างเพิ่มขึ้นแต่กินไฟน้อยลง ส่งผลให้ลดค่าใช้จ่ายไฟฟ้าได้อีกทางหนึ่ง ทั้งนี้ควรพิจารณาร่วมกับการจัดวางผังไฟฟ้าให้เหมาะสมในแต่ละโครงการ เนื่องจากลักษณะทางกายภาพพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักแต่ละโครงการมีรูปแบบไม่เหมือนกัน

2) การพิจารณาถึงการวางผังไฟฟ้าที่เหมาะสม

การวางผังไฟฟ้าดั้งเดิมของโครงการ Plum condominium ไม่ได้ออกแบบมาเพิ่มรองรับการเปิดไฟฟ้าใช้งานตลอด 24 ชม. ต่อมาภายหลัง ทางโครงการได้ได้มีการแบ่งวงจรไฟฟ้าออกเป็น 2 วงจร เพื่อการใช้งานดังกล่าวโดยการเปิดไฟดวงเว้นดวง ส่งผลให้ความสว่างไม่เพียงพอตามเกณฑ์ 50 lux วิธีที่สามารถ

แก้ไขปัญหาคือการ เปลี่ยนมาใช้หลอดไฟ LED ที่มีปริมาณแสงสูงขึ้นเพื่อชดเชยระยะห่างที่เพิ่มขึ้นจากการเปิดไฟดวงเว้นดวง

ส่วนการนำไปประยุกต์ใช้ในโครงการใหม่ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ควรมีการพิจารณาการวางวงจรไฟที่สามารถเปิดสลับได้ 2 ชุด เพื่อรองรับการใช้งานได้ทั้งวัน และควรวางตำแหน่งดวงโคมไว้บริเวณกึ่งกลางเพื่อให้มีการกระจายแสงที่ดีขึ้น สังเกตได้จากภาพที่ 3.4 ที่แสดงให้เห็นถึงสภาพดั้งเดิมของโครงการที่มีการเปิดไฟสลับวงจรจะมีค่าความสว่าง 19 lux หากมีการใช้ผังไฟฟ้ามีที่การปรับปรุงตามที่ผู้วิจัยเสนอจะมีค่าความสว่างเพิ่มขึ้นเป็น 22 lux

5.1.2 ลักษณะแสงธรรมชาติที่เกิดขึ้นในพื้นที่ทางเดินหน้าห้องพัก

จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ DAILux 4.12 จะพบว่าแสงธรรมชาติในช่วงเวลาต่างๆตลอดวันมีค่าไม่เท่ากัน และค่าความสว่างในแต่ละวันสำคัญมีค่าต่างกันเนื่องจากการโคจรของดวงอาทิตย์ทำให้ปริมาณแสงธรรมชาติที่เข้ามาในพื้นที่ทางเดินหน้าห้องพักมีปริมาณไม่เท่ากัน ซึ่งจากการจำลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1) พื้นที่ทางเดินตามยาว (calculation grid 1) วันที่ 21 ธันวาคม (winter solstice)

แสงธรรมชาติจะเข้ามาในพื้นที่ส่วนนี้ผ่านทางช่องเปิดทิศตะวันตกและทิศตะวันออก มีค่าความสว่างที่ค่อนข้างจะสม่ำเสมอตลอดทั้งวันเนื่องจากมีพื้นที่รับแสงน้อย แสงธรรมชาติจึงไม่มีผลมากนักเมื่อเทียบกับพื้นที่ตามยาวทั้งหมด

2) พื้นที่บริเวณโถงลิฟต์ (calculation grid 2) วันที่ 21 ธันวาคม (winter solstice)

แสงธรรมชาติที่เข้ามาในพื้นที่ส่วนนี้จะผ่านทางช่องเปิดทิศเหนือ ค่าความสว่างจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจากช่วงเวลา 08.00 น. และเพิ่มขึ้นสูงสุดเวลาประมาณ 14.30 น. จากนั้นค่าความสว่างจะค่อยๆลดลง โดยในช่วงเวลา 18.00 น. แสงธรรมชาติจะไม่มีอิทธิพลต่อพื้นที่

3) พื้นที่ทางเดินตามยาว (calculation grid 1) วันที่ 21 มิถุนายน (summer solstice)

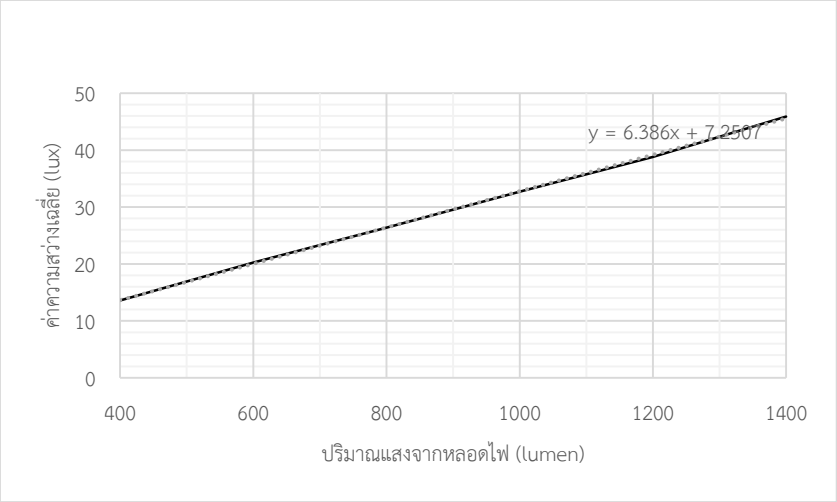
แสงธรรมชาติจะเข้ามาในพื้นที่ส่วนนี้ผ่านทางช่องเปิดทิศตะวันตกและทิศตะวันออก มีค่าความสว่างที่ค่อนข้างจะสม่ำเสมอตลอดทั้งวันเนื่องจากมีพื้นที่รับแสงน้อย แสงธรรมชาติจึงไม่มีผลมากนักเมื่อเทียบกับพื้นที่ตามยาวทั้งหมด

4) พื้นที่บริเวณโถงลิฟต์ (calculation grid 2) วันที่ 21 มิถุนายน (summer solstice)

แสงธรรมชาติที่เข้ามาในพื้นที่ส่วนนี้จะผ่านทางช่องเปิดทิศเหนือ มีลักษณะความสว่างค่อนข้างแปรปรวนตามตามช่วงเวลาระหว่างวัน ค่าความสว่างจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจากช่วงเวลา 08.00 น. และเพิ่มขึ้นสูงสุดช่วงเช้าเวลาประมาณ 10.00 น. จากนั้นค่าความสว่างจะค่อยๆลดลง ต่ำในช่วงเวลา 12.00 น. และจะเพิ่มขึ้นสูงอีกครั้งในช่วงเวลา 15.00 น. จากนั้นจะค่อยๆลดลง โดยในช่วงเวลา 18.00 น. แสงธรรมชาติยังคงมีอิทธิพลต่อพื้นที่แต่มีค่าน้อยมาก

5.1.3 การเพิ่มปริมาณแสงจากหลอดไฟ

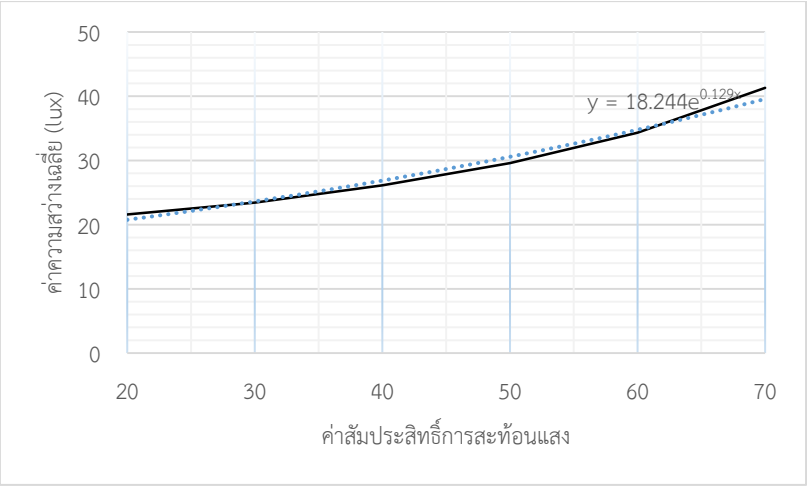
การเพิ่มปริมาณแสงจากหลอดไฟ เป็นวิธีหลักที่จะสามารถเพิ่มความสว่างของพื้นที่ได้ โดยจะมุ่งเน้นศึกษาในพื้นที่ส่วนลึกของทางเดินที่ต้องพึ่งความสว่างจากดวงโคม โดยเมื่อพิจารณาถึงการทดสอบสถานการณ์แสงสว่างที่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่เท่ากัน ปริมาณแสงจากหลอดไฟที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 200 lumen จะทำให้มีค่าความสว่างเพิ่มขึ้นเฉลี่ยคงที่ประมาณ 6 - 7 lux ที่แสดงให้เห็นในลักษณะความสัมพันธ์ของกราฟเส้นตรงดังแผนภูมิที่ 5.1



แผนภูมิที่ 5. 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประมาณแสงจากหลอดไฟที่มีผลต่อความสว่างของพื้นที่

5.1.4 การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิว

การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถสามารถเพิ่มค่าความส่องสว่างในพื้นที่ได้ โดยวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุมาก จะสะท้อนแสงธรรมชาติและแสงประดิษฐ์ได้มากขึ้น ส่งผลให้มีค่าความส่องสว่างโดยรวมของพื้นที่สูงขึ้นด้วย วิจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่จะเพิ่มประสิทธิภาพความสว่างในพื้นที่ที่มีลักษณะทางกายภาพแบบพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักที่มีความยาวได้ดีที่สุด เนื่องจากวิธีอื่นๆ เช่น การใช้หิ้งสะท้อนแสง หรือท่อนำแสง สามารถเพิ่มความสว่างได้เฉพาะพื้นที่ใกล้ช่องเปิดหน้าต่างในช่วงเวลากลางวันเท่านั้น การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงสามารถเพิ่มระดับความส่องสว่างได้ โดยไม่ต้องเพิ่มปริมาณแสงจากหลอดไฟ ดังที่แสดงในลักษณะความสัมพันธ์ของกราฟเส้นโค้งดังแผนภูมิที่ 5.2



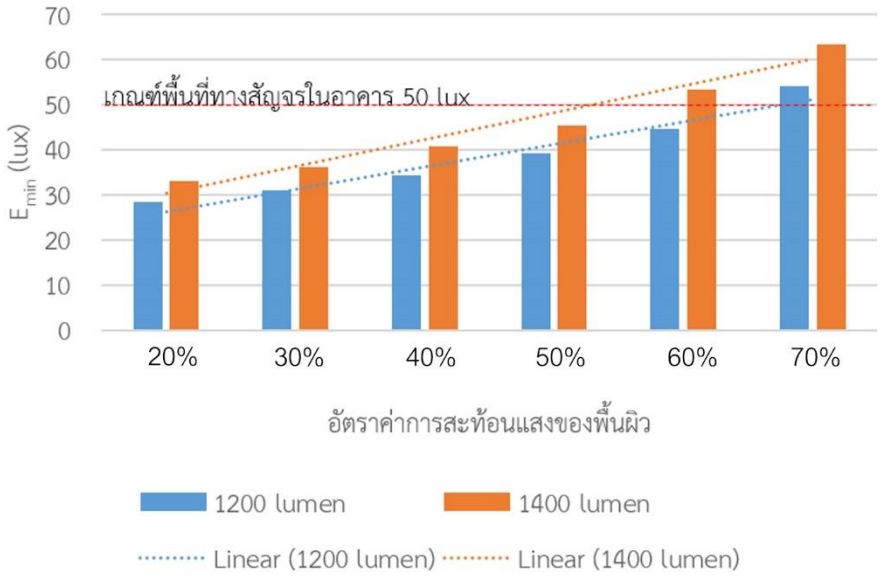
แผนภูมิที่ 5. 2 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่มีผลต่อความสว่างของพื้นที่

5.1.5 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของพื้นผิวภายในกับปริมาณแสงหลอดไฟที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพความสว่างในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก

การเพิ่มปริมาณแสงจากหลอดไฟเป็นวิธีหลักที่จะเพิ่มค่าความส่องสว่างในพื้นที่ได้ ส่วนการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงจะเป็นแนวทางที่ช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพความส่องสว่างให้ดียิ่งขึ้นอีก ดังแผนภูมิที่ 5.2 ที่แสดงให้เห็นว่าค่าความสว่างจะมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นเรื่อยๆตามเส้นกราฟ จึงควรพิจารณาถึงแนวทางทั้งสองควบคู่กันในการออกแบบแสงสว่างในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก โดยสามารถใช้ผลจากการศึกษาวิจัยไปเป็นข้อมูลเพื่อกำหนดแนวทางการออกแบบภายในและการออกแบบแสงสว่างสำหรับโครงการที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

สำหรับโครงการ Plum condominium การปรับปรุงผังไฟฟ้าให้มีการเปิดสลับวงจร ส่งผลให้ต้องใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสงสว่างมากขึ้นเพื่อที่จะให้พื้นที่มีระดับแสงธรรมชาติเพียงพอต่อเกณฑ์ 50 lux ผลจากการศึกษาวิจัยแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ดังกล่าวควรเลือกใช้หลอดไฟ LED ที่มีประมาณแสงตั้งแต่ 1,200 lumen ขึ้นไป และควรมีค่าสะท้อนแสงของพื้นผิวมากกว่า 70% โดยจาก โดยหากเลือกใช้ตามที่กล่าวมาจะทำให้พื้นที่มีค่าความสว่างขั้นต่ำ เฉลี่ย 54 lux ซึ่งเพียงพอตามเกณฑ์ โดยแผนภูมิที่ 5.3 จะแสดงขอบเขตอัตราค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวและการเลือกประสิทธิภาพของหลอดไฟจะส่งผลต่อความสว่างในพื้นที่ อย่างไรก็ตาม จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างในพื้นที่โถงลิฟต์พบว่ามีแสงสว่างเพียงพอแทบทุกกรณี จึงสามารถนำแนวทางการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงและการเลือกหลอดไฟที่มีปริมาณแสงที่เหมาะสมของพื้นที่ทางสัญจรตามยาวมาใช้ในพื้นที่ส่วนนี้ได้

หากโครงการเปิดไฟเต็มประสิทธิภาพทุกดวงโคมจะทำให้พื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักมีค่าความส่องเพิ่มขึ้นแต่ยังไม่เพียงพอตามเกณฑ์ หากมีการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุด้วยจะทำให้พื้นที่ดังกล่าวมีค่าความส่องสว่างเพียงพอ



แผนภูมิที่ 5. 3 แสดงค่าความสว่างต่ำสุด (E_{min}) เฉลี่ยทุกทิศทางทั้ง 2 วันสำคัญ ในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก โครงการ Plum condominium จากการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์สะท้อนแสงของพื้นผิว เมื่อมีการใช้หลอดไฟที่มีประสิทธิภาพแสงสว่าง 1,200 lumen และ 1,400 lumen

5.1.6 การสรุปประสิทธิภาพของการใช้อุปกรณ์ daylight sensor และ motion sensor

การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ daylight sensor ที่ทำการลดการใช้ดวงโคมบริเวณบริเวณพื้นที่ใกล้ช่องเปิดที่ได้รับอิทธิพลจากแสงธรรมชาติในช่วงเวลากลางวัน และยังมีระดับความสว่างเพียงพอตามเกณฑ์ 50 lux จะสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ปีละประมาณ 1,788 บาท/ชั้น/ปี

การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ motion sensor พิจารณาการใช้งานทั้งช่วงเวลากลางวันและกลางคืน ตั้งค่าการหรี่ไฟที่ 65% จะยังมีระดับความสว่างเพียงพอตามเกณฑ์ 20 lux เมื่อไม่มีผู้ใช้งานในพื้นที่ จะสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ปีละ 2,640 บาท/ชั้น/ปี

ปัจจุบัน อุปกรณ์เซนเซอร์ 1 ชิ้น สามารถใช้งานได้ทั้ง 2 ระบบ คือทั้ง daylight sensor และ motion sensor จะมีประสิทธิภาพการลดการใช้พลังงานต่อพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก 1 ชั้น ประมาณ 1,049 kWh/y หรือคิดเป็นมูลค่า 4,428 บาท/ชั้น/ปี และเทียบเป็นลดการใช้พลังงานได้ประมาณ 35% ของการใช้พลังงานไฟฟ้าแสงสว่างในพื้นที่ โดยจากการสอบถามราคาตามท้องตลาด พบว่า การติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวลงในพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพัก อาคารกรณีศึกษา Plum Condominium จะมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนระบบประมาณ 8,000 บาท จะมีระยะคืนที่อยู่ที่ 1.8 ปี

5.2 การนำไปประยุกต์ใช้

ข้อมูลจากการศึกษาวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพความสว่างในพื้นที่ทางสัญจรในหน้าห้องพักของโครงการคอนโดมิเนียมได้ การเลือกใช้หลอดไฟที่มีปริมาณแสงสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัสดุตกแต่งภายใน และพิจารณาควบคู่กับการวางผังไฟที่เหมาะสมจะทำให้พื้นที่ดังกล่าวมีค่าความส่องสว่างตามเกณฑ์และประหยัดพลังงานเพิ่มมากขึ้นได้

การใช้งานของอุปกรณ์ daylight sensor และ motion sensor เหมาะสมอย่างยิ่งกับพื้นที่ทางสัญจรหน้าห้องพักที่มีการเปิดไฟใช้งานตลอด 24 ชม. ทั้งโครงการที่มีเปิดใช้งานแล้ว และโครงการใหม่ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต จากผลการศึกษาวิจัยของโครงการ Plum condominium พบว่ามีการประหยัดพลังงานเพิ่มขึ้นถึง 35% และมีอัตราคืนทุนของระบบที่รวดเร็ว

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 งานวิจัยนี้ใช้การจำลองสถานการณ์แสงสว่างจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ DIALux 4.12 ดังนั้นผลที่ได้จากการจำลองอาจไม่ใช่ผลที่เกิดขึ้นจากการใช้งานจริง ซึ่งสามารถนำผลการศึกษามาเป็นแนวทางที่จะประยุกต์ใช้ในโครงการอื่นๆ หากแต่จะต้องมีการนำไปใช้จริง ควรมีการศึกษาถึงสภาพแวดล้อม ลักษณะทางกายภาพ และการใช้งานของโครงการนั้นๆตามแต่ละโครงการ

5.3.2 จากการศึกษาวิจัย มีข้อจำกัดต่างๆไม่ว่าจะเป็นการใช้โปรแกรม DIALux 4.12 ในการจำลองสถานการณ์เฉพาะ 2 วันสำคัญ คือวันที่ 21 ธันวาคม และวันที่ 21 มิถุนายนเท่านั้น ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงการเดือนอื่นๆในรอบปี เพื่อจะได้ข้อมูลที่มีความละเอียดยิ่งขึ้น

5.3.3 งานวิจัยชิ้นนี้ใช้สมการการคิดค่าไฟฟ้าอย่างง่ายจากการไฟฟ้านครหลวง ควรมีการศึกษาคิดค่าไฟฟ้าอัตรา TOD และ TOU ของอาคารคอนโดมิเนียมเพิ่มเติม

5.3.4 การวิจัยนี้ยังไม่ได้พิจารณาถึงความร้อนที่จะเข้ากระทำในพื้นทีและเรื่องของแสงบาดตาจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงเรื่องดังกล่าว

5.3.5 สามารถนำผลการวิจัยนี้ไปเป็นแนวทางในการออกแบบ เพื่อประสิทธิภาพในการทำงานร่วมกันแก่ สถาปนิกหรือมัณฑนากร ในการกำหนดแนวความคิดการออกแบบ color scheme รวมถึงเลือกใช้วัสดุ และ นักออกแบบแสงสว่างในการเลือกดวงโคมที่มีประสิทธิภาพเพียงพอต่อเกณฑ์ความสว่างได้

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กฎกระทรวงแรงงาน. (2549). ม.ป.ท.: ม.ป.พ.

ไกรฤทธิ์ ฤกษ์เกษม. (2553). ประสิทธิภาพแผงสะท้อนแสงเหนือระนาบทำงานภายในอาคาร. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

คมกฤช ชูเกียรติมั่น. (2540). การใช้แสงธรรมชาติเสริมเพื่อลดการใช้พลังงานในอาคาร กรณีศึกษาอาคารในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชำนาญ ห่อเกียรติ. (2540). เทคนิคการส่องสว่าง. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปุณญวีร์ เต็มธนานันท์. (2554). การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้แสงธรรมชาติในอาคารพาณิชย์ประเภทตึกแถว. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ผการัตน์ โกศัลล์ประไพ. (2551). แนวทางการนำแสงธรรมชาติมาใช้ในห้องอ่านหนังสือ: กรณีศึกษาหอสมุดแห่งชาติ. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.

พรรณชลัท สุริโยธิน. (2548). วัสดุก่อสร้างและหลอดไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พัชริยา ชินฮาต. (2553). การนำแสงธรรมชาติมาใช้ในอาคารพักอาศัยประเภททาวเฮ้าส์กลาง: กรณีศึกษา จังหวัดขอนแก่น. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

รุ่งทิพย์ พูนอัศวสมบัติ. (2553). ความสัมพันธ์ของค่าสะท้อนแสงพื้นผิวภายในอาคารกับประสิทธิภาพการใช้อุปกรณ์ควบคุมแสงสว่างของดวงโคมด้วยแสงธรรมชาติ. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สมาคมไฟฟ้าส่องสว่างแห่งประเทศไทย. (2003). ข้อแนะนำระดับความส่องสว่างในอาคารของประเทศไทย *TIEA - GD003*.

ภาษาอังกฤษ

Gangali, J. A. and Shaligram, A. D. (2012). Energy Efficiency Lighting Control System Design For Corridor illuminance. *Internation Journal of scietific & Engineering Research, 3*(4).

Lou, M. (1995). *Light: The shape of space*. USA.

Mostofa, S. A. (n.d.). *Smart Light Pipe Strategies in Deep Plan Office Building in Dheka, Bangladesh.* (Master degree), University of Nottingham.

Nasrollahi, N. and Shokri, E. (2016). Daylight illuminance in urban environments for visual

comfort and energy performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 66*(C).

O'Connor, J. (2008). Tips for daylighting with windows. *California Institute for technology Efficiency*.

Sawaya, L. (2005). LRV Light Reflectance Value of Paint Colors. from International Association of color Consultants North America http://thelandofcolor.com/lrv-light-reflectance-value-of-paint-colors/

Siminovitch, M. (2009) Adaptive networked exterior LED lighting for energy for safety, Secureity

and energy saving. *California Lighting technology Center lab to Marketplace.*: UC davis, USA.

Tregenza, P. and Loe, D. (2014). *The design of lighting* (Second edition ed.). England.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

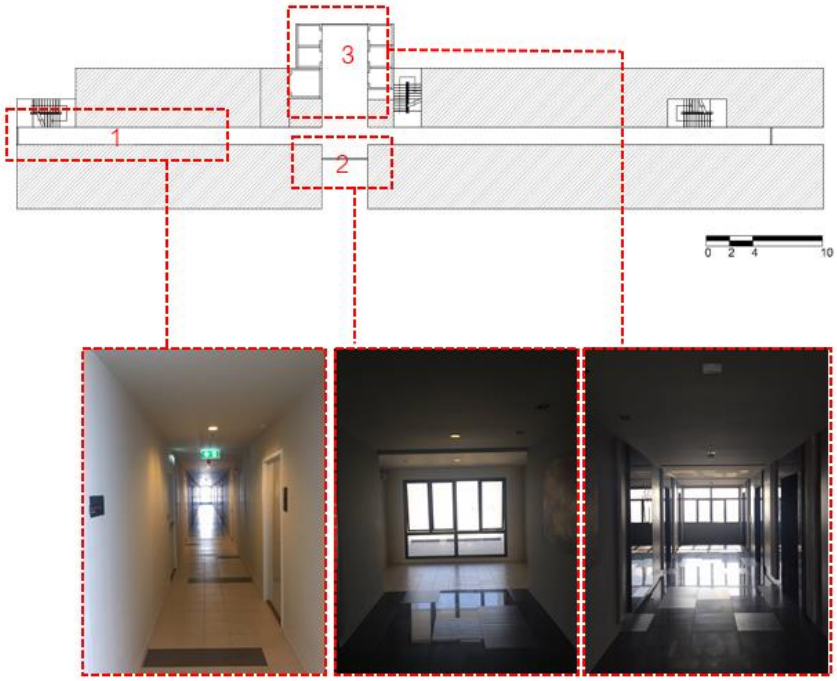
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก.

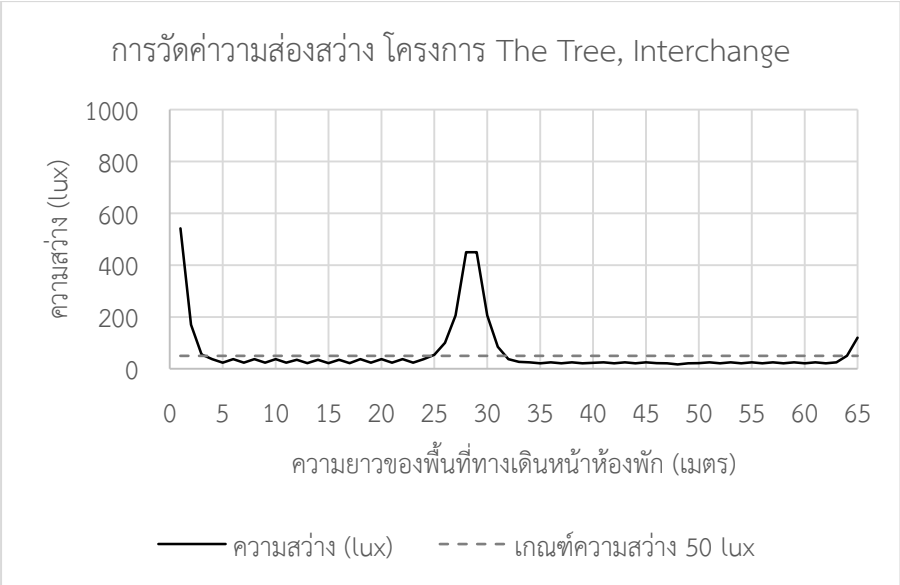
ข้อมูลโครงการที่ได้ทำการเข้าสำรวจและวัดค่าความส่องสว่าง

1. **โครงการ The Tree Interchange**

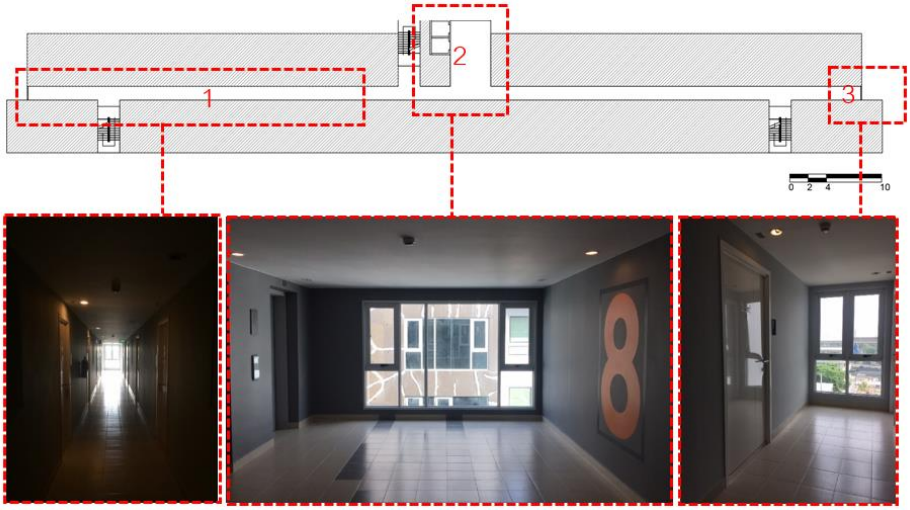


จากการเข้าสำรวจโครงการ พบว่า

1. พื้นที่ส่วนลึกตกแต่งภายในด้วยวัสดุสีอ่อนจึงทำให้รู้สึกว่ามีความสว่างโดยรวมเพียงพอ อีกทั้งตำแหน่งดวงโคมอยู่กึ่งกลางทำให้มีการกระจายแสงที่ดี
2. บริเวณอีกด้านโถงลิฟต์ ในช่วงเวลากลางวันได้รับอิทธิพลจากแสงธรรมชาติ แต่ยังมีการเปิดไฟทิ้งไว้
3. บริเวณโถงลิฟต์ มีความสว่างไม่เพียงพอ เนื่องจากวัสดุตกแต่งภายในสีค่อนข้างเข้ม

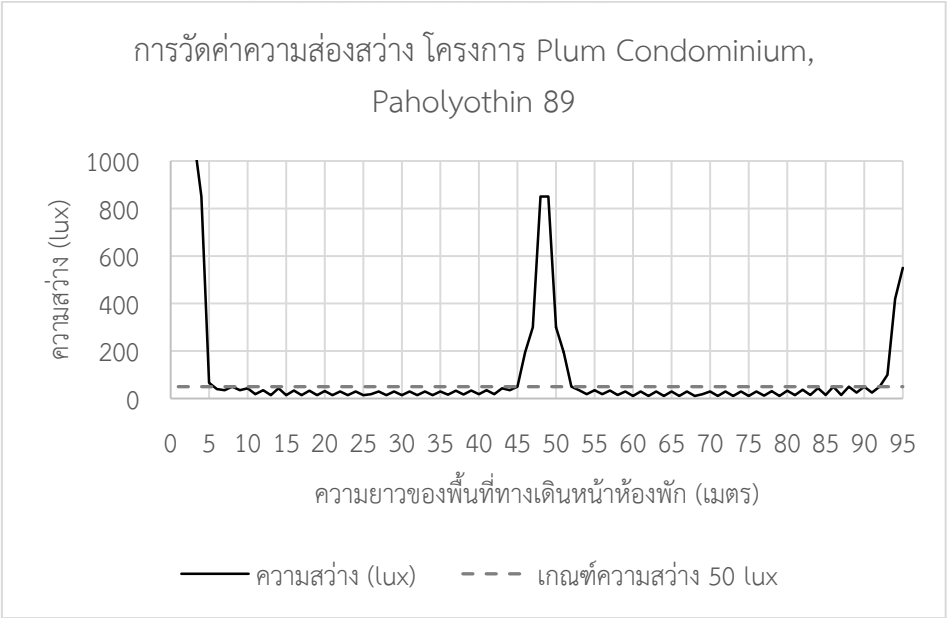


2. โครงการ Plum condominium

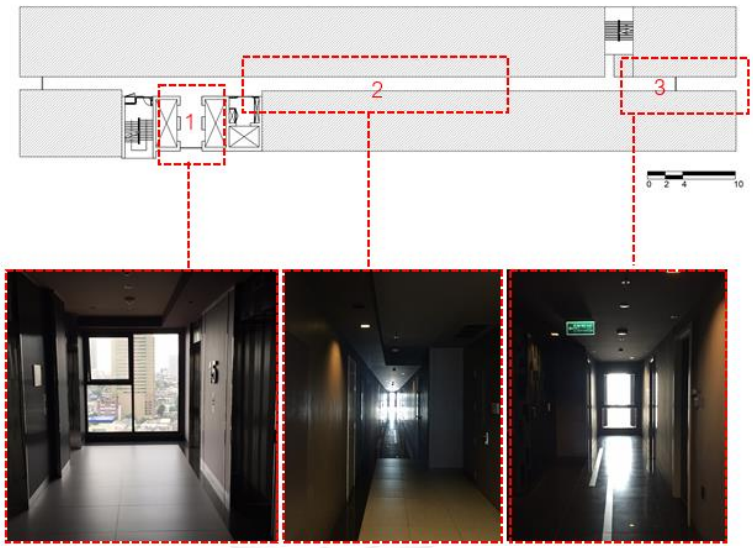


จากการเข้าสำรวจโครงการ พบว่า

1. ส่วนลึกของพื้นที่มีความสว่างไม่เพียงพอ อีกทั้งการวางตำแหน่งของดวงโคมอยู่คนละด้านของผนัง ทำให้การกระจายแสงไม่ทั่วถึง
2. บริเวณโถงลิฟต์ ในช่วงเวลากลางวันได้รับอิทธิพลจากแสงธรรมชาติ แต่ยังมีการเปิดไฟทิ้งไว้ โดยเปิดไฟสลับวงจรไฟฟ้าละละ 12 ชม. อีกทั้งใช้วัสดุตกแต่งภายในสีค่อนข้างเข้ม
3. บริเวณช่องเปิดหน้าต่างสุดปลายทาง ในช่วงเวลากลางวันจะได้รับอิทธิพลจากแสงธรรมชาติแต่ยังมีการเปิดไฟทิ้งไว้เช่นกัน

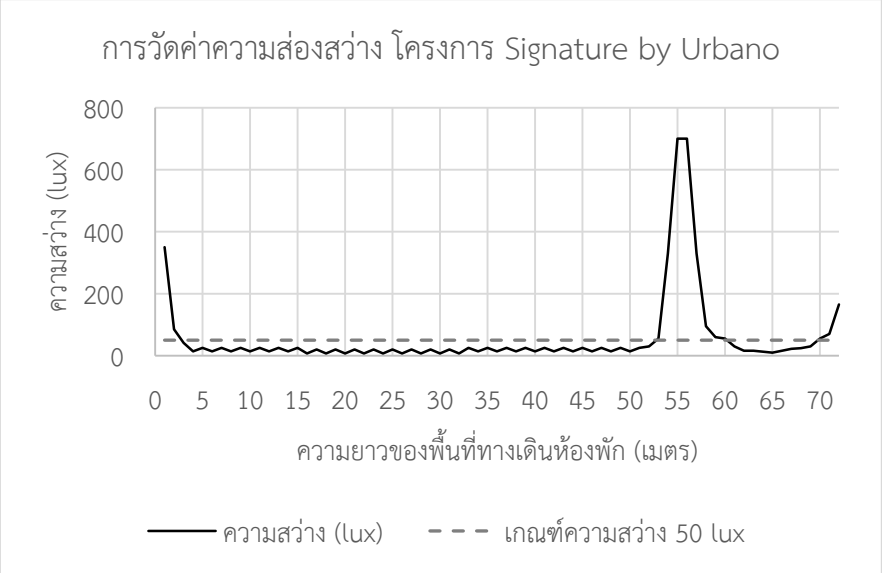


3. โครงการ Signature By Urbano



จากการเข้าสำรวจโครงการ พบว่า

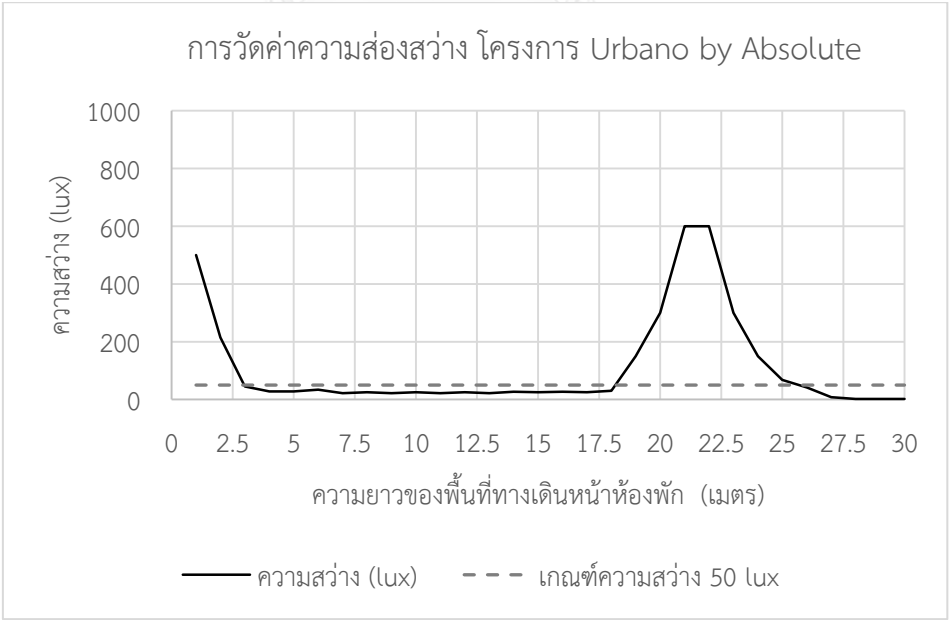
1. มีการใช้วัสดุตกแต่งภายในสีค่อนข้างเข้ม บริเวณโถงลิฟต์ ถึงแม้ว่าจะเปิดไฟทิ้งไว้ ยังคงมีค่าความสว่างไม่เพียงพอ เนื่องจากวัสดุตกแต่งภายในสีค่อนข้างเข้ม
2. เนื่องจากมีการวางผังที่ทำให้มีช่องเปิดด้านเดียว ทำส่วนลึกมีความสว่างไม่เพียงพอ
3. พื้นที่ทางเดินมีการใช้วัสดุตกแต่งภายในสีค่อนข้างเข้ม



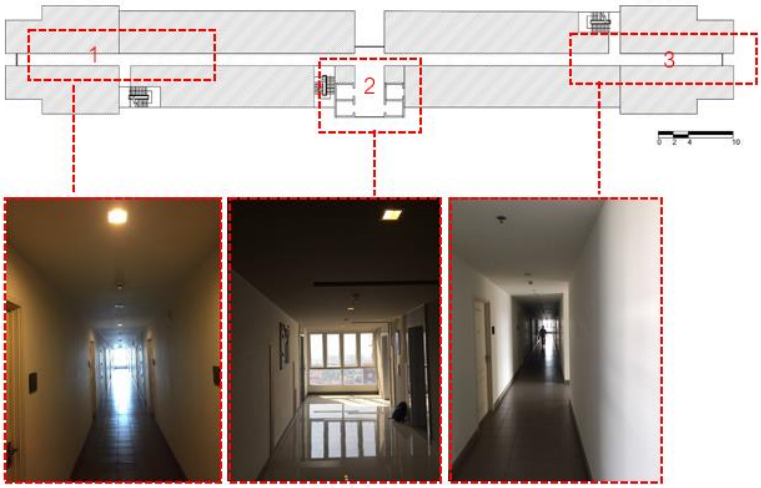
4. โครงการ Signature by Urbano

จากการเข้าสำรวจโครงการ พบว่า

1. มีการใช้กระเบื้องพื้นที่มีสีค่อนข้างเข้ม
2. เนื่องจากมีการวางผังที่ทำให้มีช่องเปิดด้านเดียว ทำส่วนลึกมีความสว่างไม่เพียงพอ
3. บริเวณโถงลิฟต์ ถึงแม้ว่าจะเปิดไฟทิ้งไว้ ยังคงมีค่าความสว่างไม่เพียงพอ เนื่องจากวัสดุตกแต่งภายในสีค่อนข้างเข้ม

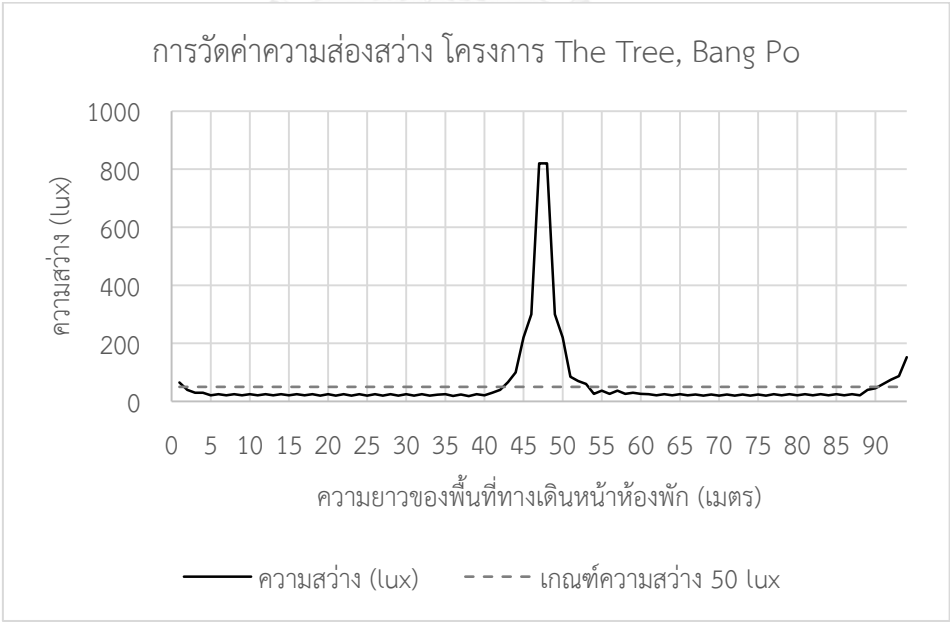


5. โครงการ The Tree, Bang Po



จากการเข้าสำรวจโครงการ พบว่า

1. มีการใช้กระเบื้องปูพื้นสีค่อนข้างเข้ม ตำแหน่งดวงโคมอยู่กึ่งกลางทำให้มีการกระจายแสงที่ดี และมีการเปิดไฟสลับดวงโคม
2. โถงลิฟต์มีการเปิดไฟทิ้งไว้ตลอดทั้งวันโดยไม่คำนึงถึงความส่องสว่างจากแสงธรรมชาติ
3. บางส่วนของพื้นที่ได้รับอิทธิพลแสงธรรมชาติจากช่องบันไดหนีไฟ ทำให้มีความสว่างขึ้น



ภาคผนวก ข.
ข้อมูลค่าความสว่างที่ได้จากการจำลองสถานการณ์แสงสว่างโดยโปรแกรม DIALux 4.12

1. วันที่ 21 ธันวาคม (winter solstice)

การจำลองสถานการณ์แสงสว่าง เมื่อมีการเลือกใช้หลอดไฟที่ปริมาณแสง 400 – 1,400 lumen ในพื้นที่ที่มีการกำหนดอัตราค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวตั้งแต่ 0.20 – 0.70 ในพื้นที่คำควณแสงสว่าง calculation grid 1 และ calculation grid 2 แสดงผลในค่าความสว่างเฉลี่ย E_{av} ค่าความสว่างต่ำสุด E_{min} และค่าความสว่างสูงสุด E_{max}

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

08.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
400Lumen RE20	53	9.6	782	400Lumen RE20	324	70	1285
400Lumen RE30	56	11	813	400Lumen RE30	339	77	1329
400Lumen RE40	59	12	850	400Lumen RE40	257	84	1380
400Lumen RE50	69	13	1009	400Lumen RE50	380	96	1469
400Lumen RE60	71	15	1156	400Lumen RE60	409	114	1502
400Lumen RE70	81	17	1028	400Lumen RE70	448	138	1579

09.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
400Lumen RE20	91	9.94	1767	400Lumen RE20	736	107	3219
400Lumen RE30	96	11	1839	400Lumen RE30	771	121	3326
400Lumen RE40	102	12	1921	400Lumen RE40	831	138	3445
400Lumen RE50	121	14	2288	400Lumen RE50	881	162	3576
400Lumen RE60	123	16	2160	400Lumen RE60	926	198	3732
400Lumen RE70	140	19	2322	400Lumen RE70	1012	249	3916

10.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
400Lumen RE20	114	10	2298	400Lumen RE20	1135	140	5063
400Lumen RE30	120	11	2391	400Lumen RE30	1187	160	5215
400Lumen RE40	139	12	2502	400Lumen RE40	1246	184	5383
400Lumen RE50	153	14	2780	400Lumen RE50	1319	219	5577
400Lumen RE60	155	16	2912	400Lumen RE60	1414	272	5796
400Lumen RE70	177	19	3028	400Lumen RE70	1539	344	6065

11.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
400Lumen RE20	114	10	2079	400Lumen RE20	1362	160	6215
400Lumen RE30	121	11	2165	400Lumen RE30	1419	183	6305
400Lumen RE40	130	13	2263	400Lumen RE40	1484	209	6399
400Lumen RE50	153	14	2701	400Lumen RE50	1567	250	6512
400Lumen RE60	157	16	2943	400Lumen RE60	1675	310	6680
400Lumen RE70	180	20	2734	400Lumen RE70	1815	391	6969

12.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
400Lumen RE20	110	11	1590	400Lumen RE20	1447	173	6604
400Lumen RE30	116	11	1661	400Lumen RE30	1503	197	6688
400Lumen RE40	125	13	1738	400Lumen RE40	1568	224	6779
400Lumen RE50	145	15	2073	400Lumen RE50	1651	226	6890
400Lumen RE60	151	17	2156	400Lumen RE60	1756	331	7028
400Lumen RE70	172	20	2100	400Lumen RE70	1899	410	7200

13.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
400Lumen RE20	113	10	2047	400Lumen RE20	1476	190	6582
400Lumen RE30	120	11	2127	400Lumen RE30	1530	215	6664
400Lumen RE40	128	12	2213	400Lumen RE40	1594	245	6754
400Lumen RE50	147	14	2330	400Lumen RE50	1679	287	6861
400Lumen RE60	156	16	2468	400Lumen RE60	1785	353	6999
400Lumen RE70	177	20	2646	400Lumen RE70	1923	436	7162

14.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
400Lumen RE20	120	10	2501	400Lumen RE20	1382	200	5997
400Lumen RE30	127	11	2595	400Lumen RE30	1434	225	6073
400Lumen RE40	136	12	2706	400Lumen RE40	1495	225	6156
400Lumen RE50	154	14	2839	400Lumen RE50	1576	297	6254
400Lumen RE60	164	16	3007	400Lumen RE60	1676	359	6382
400Lumen RE70	186	20	3216	400Lumen RE70	1806	443	6530

15.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
400Lumen RE20	109	10	2345	400Lumen RE20	1061	170	4419
400Lumen RE30	115	11	2428	400Lumen RE30	1102	189	4480
400Lumen RE40	124	12	2532	400Lumen RE40	1151	216	4545
400Lumen RE50	139	14	2656	400Lumen RE50	1216	249	4621
400Lumen RE60	148	18	2811	400Lumen RE60	1296	294	4761
400Lumen RE70	169	20	3009	400Lumen RE70	1398	360	4834

16.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
400Lumen RE20	75	9.71	1408	400Lumen RE20	586	114	2309
400Lumen RE30	79	11	1459	400Lumen RE30	609	125	2343
400Lumen RE40	84	12	1517	400Lumen RE40	637	141	2379
400Lumen RE50	94	14	1596	400Lumen RE50	674	161	2421
400Lumen RE60	101	16	1689	400Lumen RE60	720	187	2474
400Lumen RE70	114	18	1807	400Lumen RE70	778	226	2539

17.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
400Lumen RE20	38	9.44	427	400Lumen RE20	195	63	677
400Lumen RE30	40	10	443	400Lumen RE30	203	67	687
400Lumen RE40	43	11	461	400Lumen RE40	213	73	699
400Lumen RE50	47	12	484	400Lumen RE50	226	81	713
400Lumen RE60	51	15	514	400Lumen RE60	242	93	730
400Lumen RE70	59	19	551	400Lumen RE70	262	108	752

18.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
400Lumen RE20	22	8.29	40	400Lumen RE20	42	33	49
400Lumen RE30	23	9.96	43	400Lumen RE30	44	35	51
400Lumen RE40	25	11	45	400Lumen RE40	47	37	54
400Lumen RE50	28	13	48	400Lumen RE50	50	39	57
400Lumen RE60	31	16	52	400Lumen RE60	54	43	62
400Lumen RE70	35	19	58	400Lumen RE70	60	48	68

08.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
600Lumen RE20	64	14	796	600Lumen RE20	345	90	1301
600Lumen RE30	67	16	829	600Lumen RE30	361	98	1346
600Lumen RE40	71	17	866	600Lumen RE40	380	106	1398
600Lumen RE50	82	19	928	600Lumen RE50	404	119	1456
600Lumen RE60	86	21	975	600Lumen RE60	436	139	1523
600Lumen RE70	99	27	1048	600Lumen RE70	476	167	1603

09.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
600Lumen RE20	101	15	1781	600Lumen RE20	757	128	3236
600Lumen RE30	107	16	1854	600Lumen RE30	793	142	3342
600Lumen RE40	114	18	1937	600Lumen RE40	834	160	3463
600Lumen RE50	135	20	2307	600Lumen RE50	885	186	3596
600Lumen RE60	138	24	2178	600Lumen RE60	953	224	3574
600Lumen RE70	157	27	2342	600Lumen RE70	1041	279	3938

10.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
600Lumen RE20	125	15	2313	600Lumen RE20	1156	161	5080
600Lumen RE30	132	16	2407	600Lumen RE30	1208	181	5232
600Lumen RE40	141	18	2518	600Lumen RE40	1269	207	5402
600Lumen RE50	167	21	2996	600Lumen RE50	1344	243	5597
600Lumen RE60	170	24	2831	600Lumen RE60	1441	298	5817
600Lumen RE70	194	29	3048	600Lumen RE70	1569	373	6089

11.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
600Lumen RE20	125	15	2094	600Lumen RE20	1383	180	6235
600Lumen RE30	133	17	2180	600Lumen RE30	1441	204	6326
600Lumen RE40	142	18	2278	600Lumen RE40	1507	232	6420
600Lumen RE50	167	21	2720	600Lumen RE50	1591	273	6534
600Lumen RE60	172	24	2561	600Lumen RE60	1701	337	6700
600Lumen RE70	197	30	2764	600Lumen RE70	1844	420	6993

12.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
600Lumen RE20	121	15	1605	600Lumen RE20	1468	194	6623
600Lumen RE30	128	17	1676	600Lumen RE30	1525	219	6708
600Lumen RE40	137	19	1754	600Lumen RE40	1597	247	6801
600Lumen RE50	158	21	2093	600Lumen RE50	1676	290	6913
600Lumen RE60	166	25	1975	600Lumen RE60	1786	356	7052
600Lumen RE70	190	30	2121	600Lumen RE70	1928	440	7226

13.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
600Lumen RE20	124	15	2063	600Lumen RE20	1497	211	6601
600Lumen RE30	131	16	2143	600Lumen RE30	1552	236	6685
600Lumen RE40	141	18	2230	600Lumen RE40	1617	267	6775
600Lumen RE50	161	21	2349	600Lumen RE50	1703	311	6884
600Lumen RE60	170	25	2489	600Lumen RE60	1811	378	7019
600Lumen RE70	194	30	2665	600Lumen RE70	1953	466	7187

14.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
600Lumen RE20	131	15	1547	600Lumen RE20	1404	221	6017
600Lumen RE30	136	16	2610	600Lumen RE30	1456	246	6093
600Lumen RE40	148	18	2722	600Lumen RE40	1518	277	6178
600Lumen RE50	167	21	2856	600Lumen RE50	1601	321	6276
600Lumen RE60	178	24	3027	600Lumen RE60	1703	385	6406
600Lumen RE70	202	29	3237	600Lumen RE70	1836	473	6556

15.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
600Lumen RE20	120	15	2360	600Lumen RE20	1083	191	4439
600Lumen RE30	127	16	2444	600Lumen RE30	1124	210	4501
600Lumen RE40	136	18	2548	600Lumen RE40	1174	239	4566
600Lumen RE50	152	21	2672	600Lumen RE50	1240	274	4643
600Lumen RE60	163	24	2830	600Lumen RE60	1323	321	4743
600Lumen RE70	185	29	3029	600Lumen RE70	1428	389	4859

16.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
600Lumen RE20	86	14	1423	600Lumen RE20	607	135	2329
600Lumen RE30	90	16	1475	600Lumen RE30	631	147	2362
600Lumen RE40	96	18	1534	600Lumen RE40	659	164	2400
600Lumen RE50	107	20	1611	600Lumen RE50	698	185	2444
600Lumen RE60	115	22	1708	600Lumen RE60	746	213	2498
600Lumen RE70	131	27	1829	600Lumen RE70	808	256	2566

17.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
600Lumen RE20	49	14	443	600Lumen RE20	216	83	696
600Lumen RE30	52	15	459	600Lumen RE30	225	89	707
600Lumen RE40	55	16	478	600Lumen RE40	236	95	720
600Lumen RE50	61	19	503	600Lumen RE50	250	105	736
600Lumen RE60	67	23	533	600Lumen RE60	269	118	755
600Lumen RE70	76	28	572	600Lumen RE70	292	137	779

18.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
600Lumen RE20	33	13	61	600Lumen RE20	64	49	74
600Lumen RE30	35	15	64	600Lumen RE30	67	52	77
600Lumen RE40	38	17	68	600Lumen RE40	70	55	81
600Lumen RE50	42	20	72	600Lumen RE50	75	59	85
600Lumen RE60	46	23	78	600Lumen RE60	82	64	92
600Lumen RE70	53	28	87	600Lumen RE70	90	72	101

08.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
800Lumen RE20	75	19	811	800Lumen RE20	366	111	1318
800Lumen RE30	79	21	844	800Lumen RE30	383	119	1364
800Lumen RE40	84	22	882	800Lumen RE40	403	129	1417
800Lumen RE50	96	25	1047	800Lumen RE50	429	143	1475
800Lumen RE60	101	28	993	800Lumen RE60	462	165	1545
800Lumen RE70	116	37	1069	800Lumen RE70	505	196	1629

09.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
800Lumen RE20	113	19	1796	800Lumen RE20	778	149	3252
800Lumen RE30	119	21	1869	800Lumen RE30	815	163	360
800Lumen RE40	127	24	1953	800Lumen RE40	857	182	3481
800Lumen RE50	148	27	2327	800Lumen RE50	910	209	3615
800Lumen RE60	152	30	2198	800Lumen RE60	979	249	3775
800Lumen RE70	173	35	2363	800Lumen RE70	1070	307	3962

10.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
800Lumen RE20	136	19	2327	800Lumen RE20	1178	182	5096
800Lumen RE30	143	21	2421	800Lumen RE30	1230	202	5247
800Lumen RE40	153	24	2533	800Lumen RE40	1292	229	5420
800Lumen RE50	180	27	3014	800Lumen RE50	1368	266	5616
800Lumen RE60	185	32	2849	800Lumen RE60	1468	323	5838
800Lumen RE70	211	38	3068	800Lumen RE70	1597	403	6112

11.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
800Lumen RE20	136	20	2109	800Lumen RE20	1405	201	6255
800Lumen RE30	144	22	2196	800Lumen RE30	1463	226	6346
800Lumen RE40	154	24	2294	800Lumen RE40	1530	254	6437
800Lumen RE50	180	27	2739	800Lumen RE50	1616	297	6557
800Lumen RE60	186	32	2579	800Lumen RE60	1728	363	6721
800Lumen RE70	213	39	2788	800Lumen RE70	1873	450	7016

12.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
800Lumen RE20	131	20	1619	800Lumen RE20	1489	214	6638
800Lumen RE30	139	22	1691	800Lumen RE30	1547	240	6729
800Lumen RE40	149	24	1770	800Lumen RE40	1614	269	6822
800Lumen RE50	172	27	2113	800Lumen RE50	1700	313	6935
800Lumen RE60	180	33	1992	800Lumen RE60	1812	381	7075
800Lumen RE70	206	39	2141	800Lumen RE70	1958	470	7251

13.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
800Lumen RE20	135	20	2079	800Lumen RE20	1518	231	6616
800Lumen RE30	143	22	2156	800Lumen RE30	1575	258	6705
800Lumen RE40	153	24	2246	800Lumen RE40	1640	289	6797
800Lumen RE50	174	28	2366	800Lumen RE50	1728	334	6907
800Lumen RE60	184	32	2508	800Lumen RE60	1838	403	7047
800Lumen RE70	211	39	2686	800Lumen RE70	1982	496	7213

14.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
800Lumen RE20	142	19	2532	800Lumen RE20	1425	241	6036
800Lumen RE30	150	21	2626	800Lumen RE30	1478	268	6113
800Lumen RE40	160	24	2739	800Lumen RE40	1541	299	6199
800Lumen RE50	180	28	2875	800Lumen RE50	1625	344	6299
800Lumen RE60	192	32	3043	800Lumen RE60	1729	410	6430
800Lumen RE70	219	38	3257	800Lumen RE70	1866	502	6583

15.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
800Lumen RE20	131	19	2374	800Lumen RE20	1104	213	4458
800Lumen RE30	138	21	2460	800Lumen RE30	1146	232	4521
800Lumen RE40	148	23	2564	800Lumen RE40	1196	262	4578
800Lumen RE50	165	27	2690	800Lumen RE50	1264	298	4665
800Lumen RE60	177	31	2849	800Lumen RE60	1349	347	4767
800Lumen RE70	201	36	3058	800Lumen RE70	1457	419	4886

16.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
800Lumen RE20	97	19	1438	800Lumen RE20	628	156	2349
800Lumen RE30	102	21	1490	800Lumen RE30	653	169	2382
800Lumen RE40	109	23	1554	800Lumen RE40	683	187	2422
800Lumen RE50	121	26	1628	800Lumen RE50	723	210	2466
800Lumen RE60	130	30	1727	800Lumen RE60	772	240	2522
800Lumen RE70	148	36	1850	800Lumen RE70	838	258	2593

17.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
800Lumen RE20	60	19	457	800Lumen RE20	238	104	716
800Lumen RE30	63	20	475	800Lumen RE30	247	110	727
800Lumen RE40	67	22	494	800Lumen RE40	259	118	741
800Lumen RE50	75	25	520	800Lumen RE50	275	128	758
800Lumen RE60	81	30	552	800Lumen RE60	295	146	779
800Lumen RE70	93	38	592	800Lumen RE70	322	166	805

18.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
800Lumen RE20	44	18	81	800Lumen RE20	85	66	98
800Lumen RE30	47	20	85	800Lumen RE30	89	69	102
800Lumen RE40	50	22	90	800Lumen RE40	93	73	108
800Lumen RE50	56	26	96	800Lumen RE50	100	78	114
800Lumen RE60	61	31	104	800Lumen RE60	109	86	123
800Lumen RE70	71	37	116	800Lumen RE70	120	96	135

08.00 น.							
CAL 1				CAL 2			
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1000Lumen RE20	86	24	826	1000Lumen RE20	387	131	1334
1000Lumen RE30	90	26	860	1000Lumen RE30	405	140	1380
1000Lumen RE40	96	27	899	1000Lumen RE40	426	151	1434
1000Lumen RE50	109	31	1067	1000Lumen RE50	453	166	1494
1000Lumen RE60	117	38	1012	1000Lumen RE60	489	191	1567
1000Lumen RE70	133	46	1089	1000Lumen RE70	535	224	1650
09.00 น.							
CAL 1				CAL 2			
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1000Lumen RE20	123	24	1811	1000Lumen RE20	799	169	3269
1000Lumen RE30	130	26	1885	1000Lumen RE30	837	185	3376
1000Lumen RE40	139	29	1969	1000Lumen RE40	880	204	3500
1000Lumen RE50	161	32	2344	1000Lumen RE50	935	233	3635
1000Lumen RE60	167	37	2217	1000Lumen RE60	1008	274	3797
1000Lumen RE70	191	43	2383	1000Lumen RE70	1100	337	3987
10.00 น.							
CAL 1				CAL 2			
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1000Lumen RE20	147	24	2342	1000Lumen RE20	1199	202	5113
1000Lumen RE30	155	27	2437	1000Lumen RE30	1252	224	5263
1000Lumen RE40	165	30	2548	1000Lumen RE40	1315	250	5438
1000Lumen RE50	193	34	3043	1000Lumen RE50	1392	290	5636
1000Lumen RE60	199	39	2869	1000Lumen RE60	1494	348	5859
1000Lumen RE70	227	45	3088	1000Lumen RE70	1626	431	6136
11.00 น.							
CAL 1				CAL 2			
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1000Lumen RE20	147	24	2123	1000Lumen RE20	1426	221	2647
1000Lumen RE30	156	27	2210	1000Lumen RE30	1485	247	6367
1000Lumen RE40	166	30	2310	1000Lumen RE40	1553	276	6459
1000Lumen RE50	193	34	2758	1000Lumen RE50	1640	320	6578
1000Lumen RE60	201	40	2597	1000Lumen RE60	1756	388	6744
1000Lumen RE70	229	45	2809	1000Lumen RE70	1903	478	7040
12.00 น.							
CAL 1				CAL 2			
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1000Lumen RE20	142	25	1635	1000Lumen RE20	1510	235	6658
1000Lumen RE30	151	27	1706	1000Lumen RE30	1569	261	6749
1000Lumen RE40	161	30	1786	1000Lumen RE40	1636	291	6843
1000Lumen RE50	185	34	2132	1000Lumen RE50	1725	337	6957
1000Lumen RE60	194	40	2012	1000Lumen RE60	1838	406	7099
1000Lumen RE70	222	46	2162	1000Lumen RE70	1986	497	7277
13.00 น.							
CAL 1				CAL 2			
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1000Lumen RE20	146	24	2094	1000Lumen RE20	1539	252	6635
1000Lumen RE30	154	27	2172	1000Lumen RE30	1597	279	6726
1000Lumen RE40	165	30	2263	1000Lumen RE40	1663	311	6819
1000Lumen RE50	187	34	2384	1000Lumen RE50	1752	358	6929
1000Lumen RE60	199	40	2527	1000Lumen RE60	1864	428	7066
1000Lumen RE70	227	46	2707	1000Lumen RE70	2012	524	7239
14.00 น.							
CAL 1				CAL 2			
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1000Lumen RE20	153	24	2547	1000Lumen RE20	1446	262	6051
1000Lumen RE30	161	26	2643	1000Lumen RE30	1500	289	6134
1000Lumen RE40	172	29	2756	1000Lumen RE40	1563	321	6220
1000Lumen RE50	193	34	2893	1000Lumen RE50	1650	368	6321
1000Lumen RE60	207	40	3067	1000Lumen RE60	1756	435	6453
1000Lumen RE70	235	45	3281	1000Lumen RE70	1895	530	6609
15.00 น.							
CAL 1				CAL 2			
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1000Lumen RE20	142	24	2388	1000Lumen RE20	1125	234	4478
1000Lumen RE30	150	26	2476	1000Lumen RE30	1168	254	4542
1000Lumen RE40	160	29	2581	1000Lumen RE40	1219	285	4608
1000Lumen RE50	178	34	2707	1000Lumen RE50	1288	323	4687
1000Lumen RE60	191	37	2868	1000Lumen RE60	1375	373	4791
1000Lumen RE70	218	46	3073	1000Lumen RE70	1478	448	4912
16.00 น.							
CAL 1				CAL 2			
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1000Lumen RE20	108	24	1453	1000Lumen RE20	649	117	2368
1000Lumen RE30	113	26	1506	1000Lumen RE30	675	191	2403
1000Lumen RE40	121	28	1570	1000Lumen RE40	705	209	2443
1000Lumen RE50	134	32	1647	1000Lumen RE50	748	234	2489
1000Lumen RE60	145	36	1746	1000Lumen RE60	800	267	2548
1000Lumen RE70	167	49	1871	1000Lumen RE70	867	315	2618
17.00 น.							
CAL 1				CAL 2			
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1000Lumen RE20	71	23	472	1000Lumen RE20	259	124	736
1000Lumen RE30	75	25	490	1000Lumen RE30	269	131	747
1000Lumen RE40	80	27	511	1000Lumen RE40	282	140	763
1000Lumen RE50	89	32	538	1000Lumen RE50	300	152	781
1000Lumen RE60	97	38	571	1000Lumen RE60	322	172	803
1000Lumen RE70	110	48	613	1000Lumen RE70	352	196	832
18.00 น.							
CAL 1				CAL 2			
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1000Lumen RE20	55	22	101	1000Lumen RE20	106	82	123
1000Lumen RE30	58	25	107	1000Lumen RE30	111	87	128
1000Lumen RE40	63	28	113	1000Lumen RE40	117	92	134
1000Lumen RE50	70	33	120	1000Lumen RE50	125	98	142
1000Lumen RE60	77	39	131	1000Lumen RE60	136	107	154
1000Lumen RE70	88	47	145	1000Lumen RE70	151	120	169

08.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
1200Lumen RE20	97	28	841		1200Lumen RE20	408	152	1351
1200Lumen RE30	102	29	875		1200Lumen RE30	427	161	1397
1200Lumen RE40	108	32	914		1200Lumen RE40	449	174	1449
1200Lumen RE50	123	37	1086		1200Lumen RE50	478	190	1514
1200Lumen RE60	132	45	1030		1200Lumen RE60	516	216	1588
1200Lumen RE70	150	56	1109		1200Lumen RE70	565	254	1673
09.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
1200Lumen RE20	134	29	1825		1200Lumen RE20	820	189	3285
1200Lumen RE30	142	31	1900		1200Lumen RE30	858	207	3394
1200Lumen RE40	151	35	1985		1200Lumen RE40	903	226	3518
1200Lumen RE50	175	38	2362		1200Lumen RE50	960	256	3654
1200Lumen RE60	181	43	2235		1200Lumen RE60	1034	300	3818
1200Lumen RE70	208	54	2403		1200Lumen RE70	1130	367	4011
10.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
1200Lumen RE20	158	29	2357		1200Lumen RE20	1220	222	5129
1200Lumen RE30	166	32	2453		1200Lumen RE30	1274	246	5280
1200Lumen RE40	178	35	2565		1200Lumen RE40	1337	272	5456
1200Lumen RE50	207	40	3055		1200Lumen RE50	1416	313	5652
1200Lumen RE60	213	44	2889		1200Lumen RE60	1520	373	5880
1200Lumen RE70	244	52	3111		1200Lumen RE70	1655	459	6159
11.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
1200Lumen RE20	158	29	2139		1200Lumen RE20	1447	242	6294
1200Lumen RE30	167	32	2226		1200Lumen RE30	1507	268	6388
1200Lumen RE40	179	36	2326		1200Lumen RE40	1576	298	6481
1200Lumen RE50	207	41	2779		1200Lumen RE50	1665	344	6601
1200Lumen RE60	215	46	2616		1200Lumen RE60	1782	412	6765
1200Lumen RE70	248	55	2829		1200Lumen RE70	1931	506	7063
12.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
1200Lumen RE20	154	29	1650		1200Lumen RE20	1532	255	6677
1200Lumen RE30	162	32	1723		1200Lumen RE30	1591	282	6770
1200Lumen RE40	173	36	1802		1200Lumen RE40	1659	313	6865
1200Lumen RE50	198	41	2153		1200Lumen RE50	1750	361	6980
1200Lumen RE60	209	46	2031		1200Lumen RE60	1864	431	7123
1200Lumen RE70	239	55	2180		1200Lumen RE70	2017	526	7306
13.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
1200Lumen RE20	157	29	2109		1200Lumen RE20	1561	272	6655
1200Lumen RE30	166	32	2188		1200Lumen RE30	1619	300	6746
1200Lumen RE40	177	35	2280		1200Lumen RE40	1868	333	6841
1200Lumen RE50	200	40	2401		1200Lumen RE50	1777	382	6950
1200Lumen RE60	213	45	2547		1200Lumen RE60	1890	453	7090
1200Lumen RE70	244	55	2727		1200Lumen RE70	2041	552	7266
14.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
1200Lumen RE20	163	29	2563		1200Lumen RE20	1467	282	6071
1200Lumen RE30	172	32	2658		1200Lumen RE30	1522	309	6155
1200Lumen RE40	184	35	2772		1200Lumen RE40	1586	345	6241
1200Lumen RE50	206	40	2911		1200Lumen RE50	1674	391	6343
1200Lumen RE60	221	45	3085		1200Lumen RE60	1782	461	6477
1200Lumen RE70	252	55	3302		1200Lumen RE70	1924	558	6635
15.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
1200Lumen RE20	153	29	2404		1200Lumen RE20	1146	255	4497
1200Lumen RE30	161	31	2492		1200Lumen RE30	1190	276	4562
1200Lumen RE40	172	35	2598		1200Lumen RE40	1242	308	4629
1200Lumen RE50	192	38	2725		1200Lumen RE50	1313	248	4709
1200Lumen RE60	206	44	2886		1200Lumen RE60	1401	400	4814
1200Lumen RE70	235	53	3088		1200Lumen RE70	1516	497	4938
16.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
1200Lumen RE20	119	28	1468		1200Lumen RE20	670	199	2388
1200Lumen RE30	125	31	1522		1200Lumen RE30	697	213	2423
1200Lumen RE40	133	33	1587		1200Lumen RE40	729	234	2462
1200Lumen RE50	148	38	1664		1200Lumen RE50	772	259	2511
1200Lumen RE60	160	44	1765		1200Lumen RE60	872	297	2572
1200Lumen RE70	184	58	1891		1200Lumen RE70	896	345	3644
17.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
1200Lumen RE20	82	27	487		1200Lumen RE20	280	145	756
1200Lumen RE30	86	29	506		1200Lumen RE30	291	152	766
1200Lumen RE40	92	32	527		1200Lumen RE40	306	163	784
1200Lumen RE50	103	39	556		1200Lumen RE50	325	176	803
1200Lumen RE60	112	46	590		1200Lumen RE60	349	198	828
1200Lumen RE70	128	57	634		1200Lumen RE70	381	225	857
18.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
1200Lumen RE20	66	27	121		1200Lumen RE20	127	99	147
1200Lumen RE30	70	30	128		1200Lumen RE30	133	104	153
1200Lumen RE40	75	33	135		1200Lumen RE40	141	110	161
1200Lumen RE50	84	39	114		1200Lumen RE50	150	118	171
1200Lumen RE60	92	47	157		1200Lumen RE60	163	128	185
1200Lumen RE70	106	56	174		1200Lumen RE70	181	143	203

08.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1400Lumen RE20	108	33	856	1400Lumen RE20	429	172	1367
1400Lumen RE30	113	34	891	1400Lumen RE30	449	182	1415
1400Lumen RE40	120	38	930	1400Lumen RE40	472	196	1467
1400Lumen RE50	137	42	1106	1400Lumen RE50	503	214	1533
1400Lumen RE60	146	52	1049	1400Lumen RE60	543	242	1609
1400Lumen RE70	166	61	1331	1400Lumen RE70	594	282	1697

09.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1400Lumen RE20	145	33	1841	1400Lumen RE20	842	210	3302
1400Lumen RE30	153	37	1915	1400Lumen RE30	881	228	3411
1400Lumen RE40	163	41	2001	1400Lumen RE40	926	248	3536
1400Lumen RE50	188	44	2381	1400Lumen RE50	984	279	3673
1400Lumen RE60	196	50	2254	1400Lumen RE60	1061	326	3839
1400Lumen RE70	225	60	2425	1400Lumen RE70	1158	394	403

10.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1400Lumen RE20	169	33	2372	1400Lumen RE20	1241	243	5146
1400Lumen RE30	178	37	2469	1400Lumen RE30	1296	267	5298
1400Lumen RE40	190	41	2580	1400Lumen RE40	1360	294	5475
1400Lumen RE50	220	47	3075	1400Lumen RE50	1441	337	5671
1400Lumen RE60	288	52	2908	1400Lumen RE60	1549	400	5902
1400Lumen RE70	260	57	3132	1400Lumen RE70	1685	488	6183

11.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1400Lumen RE20	169	34	2154	1400Lumen RE20	1468	262	6314
1400Lumen RE30	179	37	2241	1400Lumen RE30	1529	289	6408
1400Lumen RE40	191	41	2342	1400Lumen RE40	1599	320	6502
1400Lumen RE50	220	47	2799	1400Lumen RE50	1691	368	6625
1400Lumen RE60	229	52	2635	1400Lumen RE60	1809	437	6786
1400Lumen RE70	262	58	2851	1400Lumen RE70	1961	535	7086

12.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1400Lumen RE20	164	34	1664	1400Lumen RE20	1553	276	6694
1400Lumen RE30	174	37	1737	1400Lumen RE30	1613	304	6790
1400Lumen RE40	185	42	1818	1400Lumen RE40	1682	335	6886
1400Lumen RE50	212	47	2171	1400Lumen RE50	1775	384	7002
1400Lumen RE60	233	52	2049	1400Lumen RE60	1891	456	7147
1400Lumen RE70	254	58	2199	1400Lumen RE70	2046	554	7332

13.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1400Lumen RE20	168	34	2124	1400Lumen RE20	1582	293	6675
1400Lumen RE30	177	37	2204	1400Lumen RE30	1641	321	6767
1400Lumen RE40	189	41	2297	1400Lumen RE40	1709	355	6862
1400Lumen RE50	214	47	2419	1400Lumen RE50	1801	405	6971
1400Lumen RE60	228	52	2566	1400Lumen RE60	1917	479	7113
1400Lumen RE70	260	59	2784	1400Lumen RE70	2070	579	7291

14.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1400Lumen RE20	175	33	2578	1400Lumen RE20	1488	303	6090
1400Lumen RE30	184	37	2674	1400Lumen RE30	1544	331	6175
1400Lumen RE40	196	41	2789	1400Lumen RE40	1609	367	6262
1400Lumen RE50	220	47	2928	1400Lumen RE50	1698	415	6365
1400Lumen RE60	235	52	3103	1400Lumen RE60	1808	486	6500
1400Lumen RE70	268	59	3323	1400Lumen RE70	1954	590	6661

15.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1400Lumen RE20	164	33	2419	1400Lumen RE20	1167	276	4517
1400Lumen RE30	173	37	2508	1400Lumen RE30	1212	298	4583
1400Lumen RE40	184	41	2615	1400Lumen RE40	1265	333	4651
1400Lumen RE50	205	45	2743	1400Lumen RE50	1337	372	4732
1400Lumen RE60	221	52	2905	1400Lumen RE60	1428	427	4838
1400Lumen RE70	252	62	3110	1400Lumen RE70	1545	509	4963

16.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1400Lumen RE20	130	33	1483	1400Lumen RE20	691	220	2407
1400Lumen RE30	137	36	1538	1400Lumen RE30	719	235	2444
1400Lumen RE40	145	39	1604	1400Lumen RE40	752	255	2483
1400Lumen RE50	161	43	1683	1400Lumen RE50	796	283	2533
1400Lumen RE60	176	52	1784	1400Lumen RE60	854	324	2595
1400Lumen RE70	2000	64	1913	1400Lumen RE70	952	376	2670

17.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1400Lumen RE20	93	32	502	1400Lumen RE20	301	166	755
1400Lumen RE30	98	34	522	1400Lumen RE30	313	174	786
1400Lumen RE40	105	38	544	1400Lumen RE40	329	185	806
1400Lumen RE50	116	45	573	1400Lumen RE50	350	200	826
1400Lumen RE60	127	54	609	1400Lumen RE60	376	226	852
1400Lumen RE70	144	63	655	1400Lumen RE70	411	254	883

18.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1400Lumen RE20	77	31	141	1400Lumen RE20	149	115	172
1400Lumen RE30	82	35	150	1400Lumen RE30	155	121	179
1400Lumen RE40	88	39	158	1400Lumen RE40	164	128	188
1400Lumen RE50	97	46	168	1400Lumen RE50	175	137	199
1400Lumen RE60	108	55	183	1400Lumen RE60	190	150	216
1400Lumen RE70	123	65	203	1400Lumen RE70	211	167	236

2. วันที่ 21 มิถุนายน (summer solstice)

การจำลองสถานการณ์แสงสว่าง เมื่อมีการเลือกใช้หลอดไฟที่ปริมาณแสง 400 – 1,400 lumen ในพื้นที่ที่มีการกำหนดอัตราค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวตั้งแต่ 0.20 – 0.70 ในพื้นที่คำควณแสงสว่าง calculation grid 1 และ calculation grid 2 แสดงผลในค่าความสว่างเฉลี่ย E_{av} ค่าความสว่างต่ำสุด E_{min} และค่าความสว่างสูงสุด E_{max}

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

08.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
400Lumen RE20	89	9.8	1847		400Lumen RE20	392	73	1667
400Lumen RE30	94	11	1909		400Lumen RE30	411	82	1724
400Lumen RE40	99	12	1979		400Lumen RE40	433	91	1787
400Lumen RE50	114	13	2250		400Lumen RE50	462	103	1869
400Lumen RE60	116	16	2189		400Lumen RE60	495	121	1953
400Lumen RE70	130	19	2337		400Lumen RE70	538	144	2050
09.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
400Lumen RE20	128	10	3082		400Lumen RE20	559	88	2505
400Lumen RE30	134	11	3174		400Lumen RE30	584	96	2588
400Lumen RE40	141	12	3278		400Lumen RE40	615	110	2681
400Lumen RE50	162	14	3682		400Lumen RE50	656	127	2797
400Lumen RE60	164	16	3596		400Lumen RE60	704	149	2924
400Lumen RE70	183	19	3821		400Lumen RE70	763	182	3061
10.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
400Lumen RE20	125	10	3040		400Lumen RE20	588	86	2502
400Lumen RE30	130	11	3123		400Lumen RE30	582	93	2584
400Lumen RE40	137	12	3221		400Lumen RE40	611	108	2667
400Lumen RE50	156	14	3591		400Lumen RE50	651	125	2778
400Lumen RE60	159	16	3509		400Lumen RE60	697	144	2898
400Lumen RE70	177	19	3272		400Lumen RE70	754	176	3032
11.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
400Lumen RE20	90	9.92	1859		400Lumen RE20	423	73	1895
400Lumen RE30	94	11	1915		400Lumen RE30	440	78	1920
400Lumen RE40	99	12	1973		400Lumen RE40	460	87	1948
400Lumen RE50	111	14	2192		400Lumen RE50	489	101	1999
400Lumen RE60	114	15	2148		400Lumen RE60	524	118	2081
400Lumen RE70	127	18	2269		400Lumen RE70	564	138	2174
12.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
400Lumen RE20	69	9.86	1010		400Lumen RE20	326	64	1492
400Lumen RE30	72	11	1041		400Lumen RE30	338	68	1510
400Lumen RE40	75	12	1079		400Lumen RE40	353	74	1529
400Lumen RE50	84	13	1197		400Lumen RE50	372	85	1555
400Lumen RE60	87	15	1174		400Lumen RE60	398	97	1598
400Lumen RE70	96	18	1239		400Lumen RE70	428	113	1635
13.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
400Lumen RE20	74	9.8	1393		400Lumen RE20	354	70	1587
400Lumen RE30	77	11	1432		400Lumen RE30	366	74	1605
400Lumen RE40	81	12	1471		400Lumen RE40	381	81	1625
400Lumen RE50	89	13	1526		400Lumen RE50	402	92	1656
400Lumen RE60	94	15	1597		400Lumen RE60	428	105	1694
400Lumen RE70	104	19	1680		400Lumen RE70	460	121	1734
14.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
400Lumen RE20	107	9.94	2541		400Lumen RE20	510	90	2212
400Lumen RE30	111	11	2602		400Lumen RE30	528	98	2238
400Lumen RE40	117	12	2674		400Lumen RE40	551	111	2265
400Lumen RE50	127	14	2774		400Lumen RE50	580	125	2311
400Lumen RE60	134	16	2890		400Lumen RE60	617	143	2361
400Lumen RE70	148	19	3033		400Lumen RE70	664	165	2417
15.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
400Lumen RE20	135	10	3411		400Lumen RE20	636	108	2670
400Lumen RE30	140	11	3498		400Lumen RE30	659	118	2700
400Lumen RE40	147	12	3597		400Lumen RE40	689	132	2740
400Lumen RE50	160	14	3729		400Lumen RE50	726	150	2794
400Lumen RE60	170	16	3894		400Lumen RE60	774	176	2852
400Lumen RE70	189	19	4100		400Lumen RE70	837	210	2928
16.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
400Lumen RE20	119	9.94	2804		400Lumen RE20	572	104	2313
400Lumen RE30	125	11	2883		400Lumen RE30	593	114	2338
400Lumen RE40	131	12	2976		400Lumen RE40	620	127	2374
400Lumen RE50	143	14	3092		400Lumen RE50	655	143	2422
400Lumen RE60	152	16	3240		400Lumen RE60	699	166	2478
400Lumen RE70	170	20	3424		400Lumen RE70	754	203	2539
17.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
400Lumen RE20	73	9.65	1382		400Lumen RE20	345	80	1322
400Lumen RE30	76	11	1425		400Lumen RE30	358	87	1338
400Lumen RE40	81	12	1474		400Lumen RE40	374	95	1361
400Lumen RE50	59	12	1539		400Lumen RE50	396	106	1387
400Lumen RE60	94	16	1619		400Lumen RE60	423	122	1420
400Lumen RE70	106	18	1718		400Lumen RE70	457	144	1458
18.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
400Lumen RE20	34	9.4	338		400Lumen RE20	125	52	394
400Lumen RE30	36	10	349		400Lumen RE30	130	55	399
400Lumen RE40	38	11	363		400Lumen RE40	136	59	407
400Lumen RE50	42	12	380		400Lumen RE50	144	64	416
400Lumen RE60	46	15	401		400Lumen RE60	155	71	428
400Lumen RE70	52	19	428		400Lumen RE70	168	83	440

08.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
600Lumen RE20	100	14	1862		600Lumen RE20	414	93	1683
600Lumen RE30	105	16	1925		600Lumen RE30	433	103	1741
600Lumen RE40	111	18	1955		600Lumen RE40	456	113	1805
600Lumen RE50	127	40	2268		600Lumen RE50	485	126	1866
600Lumen RE60	130	23	2207		600Lumen RE60	521	145	1974
600Lumen RE70	146	26	2358		600Lumen RE70	566	170	2074
09.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
600Lumen RE20	139	15	3097		600Lumen RE20	580	108	2522
600Lumen RE30	145	16	3190		600Lumen RE30	606	117	2605
600Lumen RE40	153	18	3293		600Lumen RE40	638	132	2699
600Lumen RE50	175	20	3701		600Lumen RE50	680	150	2816
600Lumen RE60	179	23	3615		600Lumen RE60	730	175	2945
600Lumen RE70	199	28	3841		600Lumen RE70	793	210	3084
10.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
600Lumen RE20	136	15	3055		600Lumen RE20	579	106	2518
600Lumen RE30	142	16	3139		600Lumen RE30	604	114	2601
600Lumen RE40	149	18	3237		600Lumen RE40	634	130	2685
600Lumen RE50	169	20	3610		600Lumen RE50	675	148	2797
600Lumen RE60	173	23	3526		600Lumen RE60	732	169	2919
600Lumen RE70	193	28	3747		600Lumen RE70	782	203	3057
11.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
600Lumen RE20	101	15	1874		600Lumen RE20	444	93	1915
600Lumen RE30	105	16	1931		600Lumen RE30	461	99	1940
600Lumen RE40	111	18	1990		600Lumen RE40	438	111	1966
600Lumen RE50	124	20	2211		600Lumen RE50	513	124	2018
600Lumen RE60	128	23	2167		600Lumen RE60	594	142	2103
600Lumen RE70	143	28	2290		600Lumen RE70	500	164	2196
12.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
600Lumen RE20	80	14	1026		600Lumen RE20	348	85	1512
600Lumen RE30	83	16	1057		600Lumen RE30	360	89	1530
600Lumen RE40	88	18	1096		600Lumen RE40	375	96	1550
600Lumen RE50	96	20	1216		600Lumen RE50	396	108	1577
600Lumen RE60	101	23	1193		600Lumen RE60	424	121	1621
600Lumen RE70	112	28	1260		600Lumen RE70	456	139	1660
13.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
600Lumen RE20	85	14	1408		600Lumen RE20	375	90	1607
600Lumen RE30	89	16	1448		600Lumen RE30	388	95	1626
600Lumen RE40	93	17	1488		600Lumen RE40	405	103	1646
600Lumen RE50	102	20	1543		600Lumen RE50	426	115	1678
600Lumen RE60	108	23	1615		600Lumen RE60	453	129	1717
600Lumen RE70	119	28	1699		600Lumen RE70	488	147	1760
14.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
600Lumen RE20	118	15	2556		600Lumen RE20	531	110	2232
600Lumen RE30	122	16	2618		600Lumen RE30	549	119	2258
600Lumen RE40	129	18	2691		600Lumen RE40	574	133	2286
600Lumen RE50	140	20	2791		600Lumen RE50	604	148	2333
600Lumen RE60	148	24	2908		600Lumen RE60	643	167	2385
600Lumen RE70	165	28	3054		600Lumen RE70	691	192	2441
15.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
600Lumen RE20	146	15	3427		600Lumen RE20	658	130	2690
600Lumen RE30	152	16	3513		600Lumen RE30	681	140	2721
600Lumen RE40	159	18	3614		600Lumen RE40	712	155	2761
600Lumen RE50	173	20	3747		600Lumen RE50	750	174	2818
600Lumen RE60	184	24	3913		600Lumen RE60	799	202	2876
600Lumen RE70	204	29	4122		600Lumen RE70	864	236	2953
16.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
600Lumen RE20	130	15	2818		600Lumen RE20	593	125	2332
600Lumen RE30	136	16	2899		600Lumen RE30	615	136	2358
600Lumen RE40	143	18	2988		600Lumen RE40	643	150	2395
600Lumen RE50	156	20	3110		600Lumen RE50	679	168	2444
600Lumen RE60	167	23	3259		600Lumen RE60	725	193	2501
600Lumen RE70	186	29	3445		600Lumen RE70	783	231	2565
17.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
600Lumen RE20	84	14	366		600Lumen RE20	366	101	1342
600Lumen RE30	88	16	1440		600Lumen RE30	380	108	1358
600Lumen RE40	93	18	1490		600Lumen RE40	397	117	1380
600Lumen RE50	102	20	1556		600Lumen RE50	420	130	1410
600Lumen RE60	109	22	1637		600Lumen RE60	449	148	1444
600Lumen RE70	123	27	1739		600Lumen RE70	486	172	1483
18.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
600Lumen RE20	45	14	353		600Lumen RE20	146	72	414
600Lumen RE30	48	15	365		600Lumen RE30	152	76	420
600Lumen RE40	51	16	379		600Lumen RE40	159	81	429
600Lumen RE50	46	18	398		600Lumen RE50	169	87	439
600Lumen RE60	61	23	420		600Lumen RE60	181	96	451
600Lumen RE70	69	28	449		600Lumen RE70	197	111	467

10.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
800Lumen RE20	111	19	1877		800Lumen RE20	453	114	1701
800Lumen RE30	117	21	1940		800Lumen RE30	455	124	1758
800Lumen RE40	123	23	2011		800Lumen RE40	478	135	1824
800Lumen RE50	140	27	2288		800Lumen RE50	509	149	1906
800Lumen RE60	145	29	2227		800Lumen RE60	547	170	1995
800Lumen RE70	163	34	2378		800Lumen RE70	595	198	2097
09.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
800Lumen RE20	150	19	3112		800Lumen RE20	601	129	2538
800Lumen RE30	157	21	3203		800Lumen RE30	628	138	2622
800Lumen RE40	165	23	3309		800Lumen RE40	661	154	2717
800Lumen RE50	188	27	3722		800Lumen RE50	705	173	2835
800Lumen RE60	193	31	3634		800Lumen RE60	756	199	2966
800Lumen RE70	215	37	3861		800Lumen RE70	820	236	3108
10.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
800Lumen RE20	147	19	3070		800Lumen RE20	600	127	2535
800Lumen RE30	153	21	3155		800Lumen RE30	626	135	2619
800Lumen RE40	161	23	3253		800Lumen RE40	657	151	2703
800Lumen RE50	182	26	3628		800Lumen RE50	699	170	2817
800Lumen RE60	187	31	3545		800Lumen RE60	759	194	2940
800Lumen RE70	209	37	3768		800Lumen RE70	811	229	3080
11.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
800Lumen RE20	112	19	1889		800Lumen RE20	465	114	1933
800Lumen RE30	117	21	1946		800Lumen RE30	483	120	1960
800Lumen RE40	123	23	2006		800Lumen RE40	506	133	1988
800Lumen RE50	138	27	2230		800Lumen RE50	537	147	2038
800Lumen RE60	142	31	2186		800Lumen RE60	574	166	2123
800Lumen RE70	159	36	2310		800Lumen RE70	617	190	2218
12.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
800Lumen RE20	91	19	1041		800Lumen RE20	368	105	1531
800Lumen RE30	95	21	1072		800Lumen RE30	382	110	1550
800Lumen RE40	99	23	1112		800Lumen RE40	399	118	1571
800Lumen RE50	110	27	1236		800Lumen RE50	420	131	1599
800Lumen RE60	115	31	1212		800Lumen RE60	449	146	1645
800Lumen RE70	128	35	1280		800Lumen RE70	483	164	1685
13.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
800Lumen RE20	96	19	1423		800Lumen RE20	359	110	1626
800Lumen RE30	100	21	1464		800Lumen RE30	410	116	1646
800Lumen RE40	105	23	1505		800Lumen RE40	427	124	1667
800Lumen RE50	115	27	1561		800Lumen RE50	450	138	1700
800Lumen RE60	122	31	1633		800Lumen RE60	479	153	1740
800Lumen RE70	135	35	1720		800Lumen RE70	516	173	1786
14.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
800Lumen RE20	129	19	2571		800Lumen RE20	552	131	2252
800Lumen RE30	134	21	2634		800Lumen RE30	571	140	2278
800Lumen RE40	141	23	2707		800Lumen RE40	597	155	2307
800Lumen RE50	154	27	2808		800Lumen RE50	628	170	2354
800Lumen RE60	162	31	2927		800Lumen RE60	688	191	2408
800Lumen RE70	180	37	3076		800Lumen RE70	719	219	2467
15.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
800Lumen RE20	157	19	3442		800Lumen RE20	679	151	2709
800Lumen RE30	163	21	3529		800Lumen RE30	703	161	2741
800Lumen RE40	171	23	3631		800Lumen RE40	735	178	2782
800Lumen RE50	186	27	3763		800Lumen RE50	775	198	2840
800Lumen RE60	198	31	3932		800Lumen RE60	825	226	2899
800Lumen RE70	220	37	4143		800Lumen RE70	891	263	2979
16.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
800Lumen RE20	141	19	2832		800Lumen RE20	614	146	2352
800Lumen RE30	147	21	2913		800Lumen RE30	637	159	2379
800Lumen RE40	155	23	3004		800Lumen RE40	666	173	2416
800Lumen RE50	169	27	3127		800Lumen RE50	703	192	2466
800Lumen RE60	181	31	3276		800Lumen RE60	751	220	2525
800Lumen RE70	202	35	3466		800Lumen RE70	811	260	2590
17.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
800Lumen RE20	95	19	1412		800Lumen RE20	378	121	1362
800Lumen RE30	99	21	1456		800Lumen RE30	402	131	1378
800Lumen RE40	105	23	1507		800Lumen RE40	420	140	1401
800Lumen RE50	115	26	1574		800Lumen RE50	445	154	1432
800Lumen RE60	124	30	1656		800Lumen RE60	476	174	1468
800Lumen RE70	140	35	1759		800Lumen RE70	516	202	1509
18.00 น.								
CAL 1					CAL 2			
	Eav	Emin	Emax			Eav	Emin	Emax
800Lumen RE20	56	19	268		800Lumen RE20	168	92	434
800Lumen RE30	59	20	381		800Lumen RE30	174	97	440
800Lumen RE40	63	22	396		800Lumen RE40	183	103	449
800Lumen RE50	70	25	416		800Lumen RE50	194	111	461
800Lumen RE60	76	30	439		800Lumen RE60	209	123	475
800Lumen RE70	87	38	470		800Lumen RE70	227	140	493

10.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1000Lumen RE20	122	24	1892	1000Lumen RE20	456	134	1717
1000Lumen RE30	128	26	1954	1000Lumen RE30	477	145	1755
1000Lumen RE40	135	29	2028	1000Lumen RE40	502	157	1842
1000Lumen RE50	154	32	2308	1000Lumen RE50	533	172	1925
1000Lumen RE60	160	36	2245	1000Lumen RE60	573	196	2016
1000Lumen RE70	181	42	2399	1000Lumen RE70	623	230	2118

09.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1000Lumen RE20	161	24	3127	1000Lumen RE20	622	149	2555
1000Lumen RE30	168	26	3219	1000Lumen RE30	651	161	2640
1000Lumen RE40	177	29	3326	1000Lumen RE40	683	176	2735
1000Lumen RE50	202	33	3741	1000Lumen RE50	728	197	2852
1000Lumen RE60	207	39	3653	1000Lumen RE60	781	222	2987
1000Lumen RE70	232	44	3882	1000Lumen RE70	848	263	3131

10.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1000Lumen RE20	158	24	3058	1000Lumen RE20	621	147	2551
1000Lumen RE30	165	26	3171	1000Lumen RE30	648	156	2636
1000Lumen RE40	173	29	3269	1000Lumen RE40	696	173	2721
1000Lumen RE50	196	33	3648	1000Lumen RE50	723	194	2837
1000Lumen RE60	201	39	3564	1000Lumen RE60	774	217	2961
1000Lumen RE70	225	45	3786	1000Lumen RE70	838	255	3102

11.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1000Lumen RE20	123	24	1904	1000Lumen RE20	486	134	1953
1000Lumen RE30	128	26	1962	1000Lumen RE30	505	141	1980
1000Lumen RE40	135	29	2023	1000Lumen RE40	529	155	2009
1000Lumen RE50	151	33	2248	1000Lumen RE50	561	170	2059
1000Lumen RE60	157	38	2204	1000Lumen RE60	600	190	2144
1000Lumen RE70	175	43	2331	1000Lumen RE70	645	218	2241

12.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1000Lumen RE20	102	24	1056	1000Lumen RE20	389	125	1550
1000Lumen RE30	106	26	1088	1000Lumen RE30	404	131	1570
1000Lumen RE40	112	29	1129	1000Lumen RE40	421	139	1592
1000Lumen RE50	123	33	1255	1000Lumen RE50	444	154	1621
1000Lumen RE60	129	37	1231	1000Lumen RE60	475	170	1668
1000Lumen RE70	145	43	1300	1000Lumen RE70	511	190	1709

13.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1000Lumen RE20	107	24	1438	1000Lumen RE20	417	131	1646
1000Lumen RE30	112	26	1478	1000Lumen RE30	431	137	1667
1000Lumen RE40	117	29	1520	1000Lumen RE40	450	146	1688
1000Lumen RE50	128	33	1578	1000Lumen RE50	474	161	1722
1000Lumen RE60	136	37	1653	1000Lumen RE60	506	177	1764
1000Lumen RE70	152	44	1741	1000Lumen RE70	544	198	1811

14.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1000Lumen RE20	140	24	2587	1000Lumen RE20	573	151	2271
1000Lumen RE30	145	26	2650	1000Lumen RE30	596	161	2298
1000Lumen RE40	153	29	2723	1000Lumen RE40	619	176	2328
1000Lumen RE50	167	33	2826	1000Lumen RE50	652	194	2377
1000Lumen RE60	177	39	2946	1000Lumen RE60	694	216	2432
1000Lumen RE70	197	44	3097	1000Lumen RE70	748	245	2493

15.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1000Lumen RE20	168	24	3457	1000Lumen RE20	700	172	2729
1000Lumen RE30	174	26	3545	1000Lumen RE30	725	183	2761
1000Lumen RE40	183	29	3647	1000Lumen RE40	758	202	2803
1000Lumen RE50	199	33	3782	1000Lumen RE50	799	222	2862
1000Lumen RE60	213	39	3951	1000Lumen RE60	850	250	2922
1000Lumen RE70	236	44	4163	1000Lumen RE70	921	290	3004

16.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1000Lumen RE20	152	24	2848	1000Lumen RE20	635	167	2370
1000Lumen RE30	159	26	2929	1000Lumen RE30	660	181	2400
1000Lumen RE40	167	29	3021	1000Lumen RE40	688	196	2437
1000Lumen RE50	183	33	3145	1000Lumen RE50	727	216	2488
1000Lumen RE60	195	37	3295	1000Lumen RE60	777	245	2548
1000Lumen RE70	218	45	3487	1000Lumen RE70	839	288	2616

17.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1000Lumen RE20	106	24	1426	1000Lumen RE20	408	142	1381
1000Lumen RE30	111	26	1472	1000Lumen RE30	424	152	1399
1000Lumen RE40	117	28	1523	1000Lumen RE40	443	163	1422
1000Lumen RE50	129	32	1591	1000Lumen RE50	469	178	1455
1000Lumen RE60	139	36	1675	1000Lumen RE60	502	200	1492
1000Lumen RE70	158	48	1780	1000Lumen RE70	544	231	1535

18.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1000Lumen RE20	67	23	384	1000Lumen RE20	189	113	453
1000Lumen RE30	71	24	396	1000Lumen RE30	196	119	460
1000Lumen RE40	75	27	412	1000Lumen RE40	206	126	470
1000Lumen RE50	84	32	434	1000Lumen RE50	219	135	484
1000Lumen RE60	91	38	458	1000Lumen RE60	235	149	499
1000Lumen RE70	104	48	490	1000Lumen RE70	256	169	519

08.00 น.							
CAL 1				CAL 2			
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1200Lumen RE20	133	28	1907	1200Lumen RE20	477	154	1734
1200Lumen RE30	139	31	1970	1200Lumen RE30	499	166	1793
1200Lumen RE40	147	35	2043	1200Lumen RE40	525	179	1861
1200Lumen RE50	167	38	2328	1200Lumen RE50	558	195	1945
1200Lumen RE60	174	43	2264	1200Lumen RE60	600	220	2037
1200Lumen RE70	199	53	2419	1200Lumen RE70	651	256	2141
09.00 น.							
CAL 1				CAL 2			
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1200Lumen RE20	172	29	3142	1200Lumen RE20	643	169	2571
1200Lumen RE30	180	31	3234	1200Lumen RE30	673	182	2657
1200Lumen RE40	189	35	3342	1200Lumen RE40	706	198	2751
1200Lumen RE50	215	40	3760	1200Lumen RE50	752	220	2871
1200Lumen RE60	221	44	3671	1200Lumen RE60	806	248	3008
1200Lumen RE70	249	51	3903	1200Lumen RE70	876	289	3154
10.00 น.							
CAL 1				CAL 2			
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1200Lumen RE20	169	29	3101	1200Lumen RE20	642	167	2568
1200Lumen RE30	176	31	3186	1200Lumen RE30	670	177	2653
1200Lumen RE40	185	35	3286	1200Lumen RE40	702	195	2740
1200Lumen RE50	209	40	3669	1200Lumen RE50	748	217	2856
1200Lumen RE60	216	46	3583	1200Lumen RE60	799	242	2981
1200Lumen RE70	241	52	3807	1200Lumen RE70	869	284	3125
11.00 น.							
CAL 1				CAL 2			
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1200Lumen RE20	134	29	1919	1200Lumen RE20	507	155	1972
1200Lumen RE30	140	31	1978	1200Lumen RE30	527	162	2000
1200Lumen RE40	147	35	2039	1200Lumen RE40	551	176	2030
1200Lumen RE50	164	40	2268	1200Lumen RE50	585	193	2084
1200Lumen RE60	171	43	2223	1200Lumen RE60	625	214	2165
1200Lumen RE70	192	51	2351	1200Lumen RE70	674	246	2264
12.00 น.							
CAL 1				CAL 2			
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1200Lumen RE20	113	28	1071	1200Lumen RE20	410	145	1570
1200Lumen RE30	118	31	1103	1200Lumen RE30	425	152	1591
1200Lumen RE40	124	35	1145	1200Lumen RE40	444	161	1613
1200Lumen RE50	136	39	1274	1200Lumen RE50	468	177	1642
1200Lumen RE60	143	44	1249	1200Lumen RE60	501	194	1691
1200Lumen RE70	162	51	1320	1200Lumen RE70	539	218	1734
13.00 น.							
CAL 1				CAL 2			
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1200Lumen RE20	118	28	1453	1200Lumen RE20	438	151	1665
1200Lumen RE30	123	31	1494	1200Lumen RE30	453	158	1687
1200Lumen RE40	129	35	1537	1200Lumen RE40	473	170	1709
1200Lumen RE50	142	40	1596	1200Lumen RE50	498	184	1744
1200Lumen RE60	150	44	1672	1200Lumen RE60	531	202	1788
1200Lumen RE70	169	52	1763	1200Lumen RE70	572	226	1836
14.00 น.							
CAL 1				CAL 2			
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1200Lumen RE20	151	28	2602	1200Lumen RE20	594	171	2291
1200Lumen RE30	157	31	2665	1200Lumen RE30	615	182	2318
1200Lumen RE40	165	35	2739	1200Lumen RE40	642	198	2349
1200Lumen RE50	180	40	2843	1200Lumen RE50	676	217	2400
1200Lumen RE60	191	44	2966	1200Lumen RE60	720	240	2455
1200Lumen RE70	213	54	3117	1200Lumen RE70	779	273	2523
15.00 น.							
CAL 1				CAL 2			
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1200Lumen RE20	179	29	3472	1200Lumen RE20	721	192	2748
1200Lumen RE30	186	31	3560	1200Lumen RE30	747	205	2781
1200Lumen RE40	196	35	3664	1200Lumen RE40	781	224	2824
1200Lumen RE50	213	40	3800	1200Lumen RE50	824	247	2884
1200Lumen RE60	227	45	3971	1200Lumen RE60	878	277	2947
1200Lumen RE70	253	52	4148	1200Lumen RE70	949	324	3029
16.00 น.							
CAL 1				CAL 2			
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1200Lumen RE20	163	28	2863	1200Lumen RE20	656	189	2391
1200Lumen RE30	170	31	2945	1200Lumen RE30	681	203	2420
1200Lumen RE40	179	35	3038	1200Lumen RE40	711	219	2458
1200Lumen RE50	196	40	3161	1200Lumen RE50	751	240	2510
1200Lumen RE60	210	44	3314	1200Lumen RE60	804	273	2572
1200Lumen RE70	235	53	3507	1200Lumen RE70	868	316	2642
17.00 น.							
CAL 1				CAL 2			
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1200Lumen RE20	117	28	1442	1200Lumen RE20	429	162	1401
1200Lumen RE30	122	31	1487	1200Lumen RE30	446	173	1419
1200Lumen RE40	129	33	1540	1200Lumen RE40	466	185	1442
1200Lumen RE50	142	38	1609	1200Lumen RE50	494	202	1477
1200Lumen RE60	154	44	1695	1200Lumen RE60	529	225	1516
1200Lumen RE70	175	58	1802	1200Lumen RE70	573	259	1560
18.00 น.							
CAL 1				CAL 2			
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1200Lumen RE20	78	27	399	1200Lumen RE20	210	134	472
1200Lumen RE30	82	29	412	1200Lumen RE30	218	140	480
1200Lumen RE40	88	32	429	1200Lumen RE40	229	148	492
1200Lumen RE50	98	38	451	1200Lumen RE50	243	159	506
1200Lumen RE60	106	46	477	1200Lumen RE60	262	177	524
1200Lumen RE70	122	58	511	1200Lumen RE70	286	198	546

08.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1400Lumen RE20	144	33	1922	1400Lumen RE20	498	175	1750
1400Lumen RE30	151	36	1985	1400Lumen RE30	520	187	1810
1400Lumen RE40	160	40	2060	1400Lumen RE40	547	201	1877
1400Lumen RE50	181	43	2348	1400Lumen RE50	582	219	1962
1400Lumen RE60	190	50	2383	1400Lumen RE60	627	246	2058
1400Lumen RE70	216	64	2438	1400Lumen RE70	680	284	2164

09.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1400Lumen RE20	183	33	3157	1400Lumen RE20	664	190	2588
1400Lumen RE30	191	37	3250	1400Lumen RE30	695	203	2764
1400Lumen RE40	201	41	3358	1400Lumen RE40	729	220	2769
1400Lumen RE50	228	46	3780	1400Lumen RE50	777	243	2891
1400Lumen RE60	236	51	3690	1400Lumen RE60	834	274	3029
1400Lumen RE70	265	60	3922	1400Lumen RE70	905	317	3176

10.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1400Lumen RE20	180	33	3116	1400Lumen RE20	663	188	2584
1400Lumen RE30	187	36	3202	1400Lumen RE30	692	198	2669
1400Lumen RE40	198	41	3301	1400Lumen RE40	725	217	2758
1400Lumen RE50	222	46	3687	1400Lumen RE50	772	239	2875
1400Lumen RE60	230	51	3600	1400Lumen RE60	824	266	3002
1400Lumen RE70	258	60	3826	1400Lumen RE70	896	311	3146

11.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1400Lumen RE20	145	33	1934	1400Lumen RE20	528	175	1992
1400Lumen RE30	151	37	1993	1400Lumen RE30	548	183	2020
1400Lumen RE40	159	41	2055	1400Lumen RE40	574	198	2051
1400Lumen RE50	177	45	2287	1400Lumen RE50	609	216	2107
1400Lumen RE60	186	51	2241	1400Lumen RE60	651	239	2184
1400Lumen RE70	208	60	2370	1400Lumen RE70	702	272	2287

12.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1400Lumen RE20	124	33	1086	1400Lumen RE20	431	166	1589
1400Lumen RE30	129	36	1119	1400Lumen RE30	447	173	1611
1400Lumen RE40	136	40	1162	1400Lumen RE40	467	186	1634
1400Lumen RE50	149	44	1293	1400Lumen RE50	492	199	1664
1400Lumen RE60	158	51	1268	1400Lumen RE60	527	219	1716
1400Lumen RE70	179	59	1341	1400Lumen RE70	567	245	1759

13.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1400Lumen RE20	129	33	1469	1400Lumen RE20	459	172	1685
1400Lumen RE30	135	36	1510	1400Lumen RE30	475	178	1707
1400Lumen RE40	141	40	1553	1400Lumen RE40	496	192	1730
1400Lumen RE50	155	44	1613	1400Lumen RE50	521	206	1765
1400Lumen RE60	165	51	1691	1400Lumen RE60	557	226	1811
1400Lumen RE70	186	59	1783	1400Lumen RE70	600	253	1861

14.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1400Lumen RE20	162	33	2617	1400Lumen RE20	615	191	2310
1400Lumen RE30	168	36	2681	1400Lumen RE30	673	203	2338
1400Lumen RE40	177	41	2756	1400Lumen RE40	665	220	2369
1400Lumen RE50	193	47	2861	1400Lumen RE50	700	240	2421
1400Lumen RE60	206	51	2985	1400Lumen RE60	746	265	2478
1400Lumen RE70	230	61	3137	1400Lumen RE70	808	302	2549

15.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1400Lumen RE20	190	33	3488	1400Lumen RE20	742	212	2768
1400Lumen RE30	197	36	3577	1400Lumen RE30	769	226	2801
1400Lumen RE40	208	41	3681	1400Lumen RE40	804	247	2845
1400Lumen RE50	226	47	3818	1400Lumen RE50	848	271	2906
1400Lumen RE60	241	52	3990	1400Lumen RE60	904	303	2972
1400Lumen RE70	270	63	4205	1400Lumen RE70	977	351	3054

16.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1400Lumen RE20	174	33	2844	1400Lumen RE20	677	210	2411
1400Lumen RE30	182	36	2961	1400Lumen RE30	703	224	2440
1400Lumen RE40	191	41	3055	1400Lumen RE40	734	242	2479
1400Lumen RE50	209	45	3179	1400Lumen RE50	775	264	2533
1400Lumen RE60	224	52	3334	1400Lumen RE60	830	298	2596
1400Lumen RE70	253	62	3527	1400Lumen RE70	897	343	2668

17.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1400Lumen RE20	128	33	1457	1400Lumen RE20	450	182	1420
1400Lumen RE30	134	36	1503	1400Lumen RE30	468	194	1439
1400Lumen RE40	141	39	1557	1400Lumen RE40	489	207	1463
1400Lumen RE50	156	43	1627	1400Lumen RE50	518	225	1499
1400Lumen RE60	170	52	1714	1400Lumen RE60	555	250	1539
1400Lumen RE70	192	66	1823	1400Lumen RE70	602	286	1586

18.00 น.

	CAL 1				CAL 2		
	Eav	Emin	Emax		Eav	Emin	Emax
1400Lumen RE20	89	32	414	1400Lumen RE20	231	155	492
1400Lumen RE30	94	34	428	1400Lumen RE30	240	161	501
1400Lumen RE40	101	39	445	1400Lumen RE40	253	171	513
1400Lumen RE50	111	45	468	1400Lumen RE50	268	182	529
1400Lumen RE60	122	54	497	1400Lumen RE60	289	203	548
1400Lumen RE70	139	67	532	1400Lumen RE70	316	277	572

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ต่อพงษ์ ลิ่มลัญจกร เกิดเมื่อวันที่ 2 เมษายน พ.ศ.2528 ที่จังหวัดกรุงเทพ จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียน เทพศิรินทร์ จึงเข้าศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษา ที่คณะศิลปกรรม ภาควิชาออกแบบภายใน มหาวิทยาลัยกรุงเทพ และจบการศึกษาหลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตรบัณฑิตเมื่อ พ.ศ.2552 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญามหาบัณฑิต ในคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ ภาควิชาสถาปัตยกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2558

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University